



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Biológicas

Escuela Profesional de Ciencias Biológicas

**Distribución de los tipos de costra biológica del suelo
en la Reserva Nacional de Lachay (Lima) en base al
análisis multiespectral de sensores remotos**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Biólogo con mención en
Botánica

AUTOR

Walter David ESPÍNDOLA CÁCERES

ASESOR

César Augusto ARANA BUSTAMANTE

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Espíndola, W. (2019). *Distribución de los tipos de costra biológica del suelo en la Reserva Nacional de Lachay (Lima) en base al análisis multiespectral de sensores remotos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Biológicas, Escuela Profesional de Ciencias Biológicas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**ACTA DE SESIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
BIÓLOGO CON MENCIÓN EN BOTÁNICA
(MODALIDAD: SUSTENTACIÓN DE TESIS)**


Siendo las 15:05 horas del 15 de enero de 2019, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Biológicas y en presencia del jurado formado por los profesores que suscriben, se dio inicio a la sesión para optar al Título Profesional de Biólogo con mención en **Botánica** de **WALTER DAVID ESPÍNDOLA CÁCERES**.

Luego de dar lectura y conformidad al expediente N° 022-EPCB-2018, el titulando expuso su tesis: "DISTRIBUCIÓN DE LOS TIPOS DE COSTRA BIOLÓGICA DEL SUELO EN LA RESERVA NACIONAL DE LACHAY (LIMA) EN BASE AL ANÁLISIS MULTIESPECTRAL DE SENSORES REMOTOS", y el Jurado efectuó las preguntas del caso calificando la exposición con la nota 19..., calificativo: Aprobado con méritos honores. Finalmente, el expediente será enviado a la Escuela Profesional de Ciencias Biológicas y al Consejo de Facultad para que se apruebe otorgar el Título Profesional de Biólogo con mención en **Botánica** a **WALTER DAVID ESPÍNDOLA CÁCERES** y se eleve lo actuado al Rectorado para conferir el respectivo título, conforme a ley.

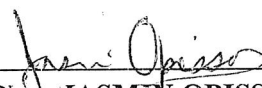
Siendo las 17:00 horas se levantó la sesión.

Ciudad Universitaria, 15 de enero de 2019.


Mg. ASUNCIÓN CANO ECHEVARRÍA
(PRESIDENTE)


Elgo. CESAR ARANA BUSTAMANTE
(ASESOR)


Mg. JOSÉ ROQUE GAMARRA
(MIEMBRO)


Elga. JASMIN OPISSO MEJIA
(MIEMBRO)

A mis padres

Walter y Maritza

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mi familia, a mis padres Walter y Maritza por su cariño y amor paternal, su apoyo, paciencia y primordial fuente de inspiración, motivo por el cual me permite llegar hasta donde estoy. Eternamente agradecidos por haberme forjado como la persona que soy, muchos de mis logros se los debo a ustedes, entre los que se incluyen este. A mis hermanas Camila y Emily por su amistad, hermandad y compañía única.

Al Dr. César Arana Bustamante, coordinador de la división de Ecología del Museo de Historia Natural – UNMSM, mi asesor, por la oportunidad ofrecida de formar parte del laboratorio de Ecología y participar en diversos proyectos los cuales fueron claves para el desarrollo de mi vida académica y profesional, por la confianza y el apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Tomás Carlo Joglar, profesor del departamento de Biología – Pennsylvania State University, por sus valiosos comentarios e ilustración en los análisis complementarios.

Al Vicerrectorado de Investigación y Postgrado – UNMSM por la fuente de financiamiento de los proyectos CON-CON: 151001111-2015 y 161001021-2016

A los encargados y guardaparques de la Reserva Nacional de Lachay, por los permisos y facilidades brindados, los cuales me permitieron desarrollar este trabajo.

A mis compañeros del departamento de Ecología, por su amistad y agradable compañía en innumerables aventuras durante nuestro desarrollo académico y profesional.

A los miembros del jurado por sus comentarios y sugerencias importantes para la tesis.

Y un muy especial agradecimiento a Bresly, por su grandiosa amistad y cariño, fuente de inspiración y vibras para seguir adelante.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
INDICE DE TABLAS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE ANEXOS	VII
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	2
2.1. Costra Biológica del Suelo	2
2.2. Revisión de la CBS en el Perú	4
2.3. Sensoramiento remoto y las CBS	5
III. OBJETIVOS	9
3.1. GENERAL	9
3.2. ESPECÍFICOS	9
IV. HIPÓTESIS	10
V. MATERIALES Y MÉTODOS	11
5.1. AREA DE ESTUDIO	11
5.1.1. Reserva Nacional de Lachay	11
5.2. MATERIALES	14
5.2.1. De Campo	14
5.2.2. Procesamiento informático	14
5.3. MÉTODOS	15
5.3.1. Identificación de las CBS en la R.N. de Lachay	15
5.3.2. Distribución de las CBS en la R.N. de Lachay	19

VI. RESULTADOS	25
6.1. Caracterización de la CBS mediante el uso del escalamiento multidimensional no métrico	25
6.1.1. Evaluación de la composición comunitaria de la CBS en la R.N. de Lachay	28
6.1.2. Variación de la altitud a la que se desarrolla y resistencia a la penetración de la CBS en la R.N. de Lachay	31
6.1.3. Aplicación del escalamiento multidimensional no métrico	35
6.2. Firmas Espectrales de la CBS.....	38
6.3. Clasificación de la CBS	45
6.4. Matriz de confusión y validación de la clasificación	47
6.5. Generación del mapa de la R.N. de Lachay con los tipos de CBS	49
VII. DISCUSIÓN	53
7.1. Clasificación de los tipos de CBS en la R.N. de Lachay.....	53
7.2. Características espectrales y la firma espectral de las CBS en la R.N. de Lachay.....	55
7.3. Validación de la clasificación de CBS en la R.N. de Lachay a partir de imágenes satelitales.....	58
7.4. Mapa de distribución y extensión de la CBS en la R.N. de Lachay	63
VIII. CONCLUSIONES	65
IX. RECOMENDACIONES	67
X. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	68
XI. ANEXOS.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Base de datos empleado para generar el modelo predictivo.....	21
Tabla 2. Tipos de Costra Biológica del Suelo identificados en la Reserva Nacional de Lachay.....	28
Tabla 3. Prueba de Kruskal-Wallis y medida de tendencia central y de dispersión a la altitud (m) donde se desarrolla cada tipo de costra biológica del suelo.	32
Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis y medida de tendencia central y de dispersión de la resistencia mecánica a la penetración (kg/cm ²) de cada tipo de costra biológica del suelo.....	34
Tabla 5. Importancia de las bandas por clase de CBS en base a la disminución media de precisión. En color oscuro se muestras la de mayor importancia.....	47
Tabla 6. Matriz de confusión evaluando la clasificación de tipos de CBS por medio del algoritmo <i>Random Forest</i>	48
Tabla 7. Extensión de los tipos de CBS presentes en la R.N. de Lachay.	49
Tabla 8. Intervalos de estrés y su interpretabilidad para justificar la disimilitud y distancia de muestras evaluadas (Kruskal, 1964; Clarke, 1993).	55
Tabla 9. Precisión e índice Kappa de los modelos clasificadores producidos por el algoritmo <i>Random Forest</i> en base al número de variables por validación cruzada.....	58
Tabla 10. Precisión global, de productor y de usuario por cada superficie obtenido de la Clasificación de las CBS mediante <i>Random Forest</i>	61
Tabla 11. Índice Kappa y su medida de fuerza de concordancia (Landis & Koch, 1977).	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de la costra biológica del suelo con organismos típicos Belnap. Extraído de: Belnap et al., 2001, (ilustración Renate Klein-Rodder).....	2
Figura 2. Costra biológica del suelo encontrado en diferentes lugares del Perú.....	5
Figura 3. Representación gráfica de la loma y su zonificación de la vegetación. (Tomado de Ellenberg, 1959).....	12
Figura 4. Ubicación de la Reserva Nacional de Lachay.	13
Figura 5. Diseño las parcelas de 30 x 30 m utilizada en el experimento, nótese la ubicación de cada subparcela de 1 x 1 m ubicada dentro de ella.....	16
Figura 6. Ubicación de los transectos en donde se colocaron las parcelas. RN: Reserva Nacional de Lachay. ZA: zona de amortiguamiento de la reserva.....	18
Figura 7. Tipos de Costra Biológica del Suelo encontrados en la Reserva Nacional de Lachay. (a) Arena, (b) CBS Lisa Clara, (c) CBS Lisa Oscura, (d) CBS Rugosa-Ondulante, (e) CBS Rugosa con abundante Materia Orgánica y (f) CBS Rugosa con vegetación persistente.....	26
Figura 8. Distintos componentes biológicos encontrados en la CBS. (a) <i>Oscillatoria</i> sp.; (b) <i>Microcoleus vaginatus</i> ; (c) Bryophyta; (d) <i>Chrysothrix</i> sp.; (e) <i>Caloplaca</i> sp.	27
Figura 9. Gráfico de barras de la cobertura presente en las parcelas por tipo de CBS.	30
Figura 10. Relación de las tendencias central y de dispersión a la altitud donde se desarrolla cada tipo de costra biológica del suelo.	33
Figura 11. Relación de las tendencias central y de dispersión de la resistencia mecánica a la penetración de cada tipo de costra biológica del suelo.....	35

Figura 12. Diagrama de Shepard, en donde se aprecia la relación entre la distancia de Ordenamiento y la disimilitud de los datos. Una menor dispersión presente en el diagrama demuestra un buen ajuste. Ajuste lineal: 0.986, ajuste no-lineal: 0.986.....	36
Figura 13. (a) Representación del escalamiento multidimensional no-métrico de los tipos de CBS presentes en la R.N. de Lachay. Figura 13. (b) y Figura 13. (c) se muestran las isolíneas producidas por las variables altitud y resistencia mecánica a la penetración respectivamente.	37
Figura 14. Diagrama de dispersión entre las combinaciones posibles de las bandas con sus respectivos valores R^2	38
Figura 15. Diagrama de dispersión entre las combinaciones posibles de las bandas, la información introducida esta agrupada en base a su categoría.	39
Figura 16. Diagrama de dispersión de 3 tres ejes, banda 2, banda 3, y banda 6.	40
Figura 17. Prueba de Kruskal-Wallis y medida de la tendencia central y medida de la dispersión de la energía reflejada de la superficie de la CBS por banda. Tabla y gráfico respectivos: (a) Banda 2, (b) Banda 3 y (c) Banda 4.	42
Figura 18. Firmas espectrales de las CBS encontrados en la R.N. de Lachay.	44
Figura 19. Evaluación de la precisión de los diferentes modelos clasificadores <i>Random Forest</i> en base al número de variables que toma aleatoriamente para tomar una decisión.....	45
Figura 20. Visualización de la importancia de las bandas para la clasificación de los tipos de CBS en la R.N. de Lachay a partir de imágenes satelitales. (a) Influencia negativa por ausencia de bandas en la disminución de la precisión de la predicción. (b) Influencia negativa por ausencia de las bandas en la disminución del índice Gini (pureza) en los nodos.	46

Figura 21. Representación gráfica de la extensión de los tipos de CBS presentes en la Reserva Nacional de Lachay.....	50
Figura 22. Mapa de los tipos de cobertura de suelo clasificada en la Reserva Nacional de Lachay y zona de amortiguamiento.....	51
Figura 23. Mapa de los tipos de cobertura de suelos registradas en la Reserva Nacional de Lachay.	52
Figura 24. Diagramas de dispersión de las Bandas 2, 3 y 6. (a) Banda 2 y Banda 3 con $R^2=1.00$; (b) Banda 2 y Banda 6 con $R^2=0.89$; (c) Banda 3 y Banda 6 con $R^2=0.90$	56
Figura 25. Importancia de variable para cada una de las siete categorías de superficie. Mostrándose en el eje y la disminución de la precisión en ausencia de cada banda... ..	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I: Mapa Base Reserva Nacional de Lachay, Ministerio del Ambiente – Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado – 2015, Fuentes: SERNANP, IGN, INEI, MTC.	76
Anexo II: Clasificación de diferentes tipos de Costra Biológica del Suelo sugerida por Belnap et al., (2001).	78
Anexo III: Clasificación de los tipos de Costra Biológica del Suelo planteado por Williams et al., (2012).	78
Anexo IV: Base de datos: Colección de información obtenida de las parcelas. Matriz con variables: proporción de cobertura por grupo funcional, altitud, resistencia mecánica a la penetración.	79
Anexo V: Base de datos: Colección de información obtenida de los píxeles de la imagen satelital. Datos para ENTRENAMIENTO. Matriz con variables: energía reflejada por tipo de banda.	84
Anexo VI: Base de datos: Colección de información obtenida de los píxeles de la imagen satelital. Datos para PRUEBA. Matriz con variables: energía reflejada por tipo de banda.....	88
Anexo VII: Tabla comparativa de la Normalidad de las muestras categorizadas por superficie y las variables mediante el test estadístico Shapiro-Wilk. Para valores cuyo p-value son mayores a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula. H0: La muestra viene de una población con distribución normal.	91
Anexo VIII: Prueba U Mann-Whitney (Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) para dos muestras independientes pareada por bandas.	92

RESUMEN

A lo largo de la costa del Perú, en el desierto de Atacama-Sechura, ocurren zonas con características ambientales que permiten el desarrollo de la costra biológica del suelo (CBS). No obstante, el conocimiento de las CBS en el Perú es limitado debido a que apenas se están iniciando estudios relacionados a este tipo de comunidades, poniendo en condición crítica el manejo y la conservación de estas y de su ambiente. El objetivo de éste trabajo fue identificar, clasificar y documentar la distribución geográfica de la CBS en la Reserva Nacional de Lachay durante la época seca en base a información satelital y al análisis de sus características espectrales. Mediante el uso del escalamiento multidimensional (NMDS) se lograron caracterizar cinco tipos de CBS en base a composición comunitaria, aspectos topográficos como altitud a la cual se desarrollan, y propiedades físicas como la resistencia mecánica a la penetración. En cuanto al análisis de las características espectrales, clasificación, y distribución de las CBS a partir de las imágenes satélite Landsat 8, se utilizó el algoritmo de aprendizaje de máquinas *Random Forest*, obteniéndose una precisión global de 87.32% con un índice Kappa de 0.84, mostrando una casi perfecta relación positiva entre la clasificación producida en el mapa y la realidad. Se estimó la extensión de las CBS en la Reserva Nacional (incluyendo zona de amortiguamiento) de 59.84 km² (71% del área total), siendo la CBS lisa oscura la de mayor extensión, abarcando unos 22.21 km² (26% de toda la CBS). Estos resultados demuestran el logro de cartografiar las CBS con casi perfecta precisión y en mínima inversión de tiempo. Además, abre la posibilidad de realizar trabajos posteriores como extender la detección y cartografiar CBS en toda la costa, realizar modelos de distribución e interacción de especies/comunidades, y monitoreo de procesos de perturbación natural y/o antropogénica.

Palabras claves: Costra biológica del suelo, CBS, distribución, Landsat, Random Forest, Reserva Nacional de Lachay

ABSTRACT

Along the Coast of Peru, in the Atacama-Sechura Desert, environmental characteristics presented in some areas enable the development of biological soil crust (BSC). However, the knowledge of the BSC in Peru is limited because studies related to this type of communities are just initiating, becoming their environment, management, and conservation in a critical condition. The objective of this study was to identify, to classify, and to document the BSC geographical distribution in the Reserva Nacional de Lachay during the dry season based on satellite imagery and the analysis of its spectral features. Using multidimensional scaling (NMDS), five types of BSC were characterized based on their community composition, topographic aspects such as altitude at which they develop, and physical properties such as penetration resistance. In terms of the analysis of the spectral features, classification, and distribution of BSC from Landsat 8 satellite imagery, I used *Random Forest* a machine learning algorithm, which it was obtained an overall precision of 87.32% with a Kappa index of 0.84, showing an almost perfect positive relationship between the classification produced on the map and the reality. As a result, it was estimated an extension of 59.84 km² (71% of the total area) for the BSC (including the buffer area), being the dark smooth CBS with the largest extension, about 22.21 km² (26% of the BSC). These results demonstrate the achievement of mapping BSC with almost perfect precision and minimal time investment. In addition, this study opens the possibility of carrying out further work such as extending the detection, and mapping of BSC through the coast, performing species/communities distribution and interaction models, and monitoring natural and/or anthropogenic disturbance process.

Keyword: Biological soil crust, BSC, distribution, Landsat, Random Forest, Reserva Nacional de Lachay.

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a Krebs (1972), una comunidad es un ensamble de grupos de poblaciones de especies que interactúan y comparten un hábitat (prescita o potencial) y tiempo. Por ende, la ecología de comunidades es aquella que estudia los factores que influyen la biodiversidad, abundancia, interacción y distribución de especies, como la estructura de la comunidad (Morin, 2011). Uno de los intereses dentro de la ecología de comunidades es demostrar como la constitución de las especies o su misma composición cambia de una comunidad a otra en una gradiente (Whittaker, 1969; Wilson and Mohler, 1983; Oksanen & Tonteri, 1995). Siendo común dentro de este campo la evaluación de un considerable número de variables a la vez, los ecólogos tienden a usar herramientas y métodos de análisis multivariado, siendo el ordenamiento un método cuantitativo de análisis el cual se concentra en representar las relaciones de los datos en un espacio de baja dimensión (Clarke, 1993; Gauch & Gauch, 1982; Goodall, 1954). Por otro lado, en cuanto el análisis espacial en ecología se ha vuelto común el uso del sensoramiento remoto por medio de imágenes satelitales, resultando una buena alternativa para llevar a cabo estudios de escala espacial mayor y de seguimiento temporal. Por ejemplo, estos métodos son usados para predecir la distribución y la variabilidad espacial en la riqueza de especies, identificar y detallar las características biofísicas de los hábitats de las especies, detectar y modelar las respuestas de comunidades a los cambios naturales y antropogénicos, entre otras (Aplin, 2005; Turner *et al.*, 2003; Kerr & Ostrovsky, 2003). El presente trabajo tiene por propósito examinar, describir y clasificar las comunidades de costras biológicas del suelo (CBS) en la Reserva Nacional de Lachay mediante el método de ordenamiento y determinar su distribución mediante imágenes satelitales.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Costra Biológica del Suelo

La costra biológica del suelo (CBS) es una comunidad de organismos de niveles microscópicos y macroscópicos que consiste de cianobacterias, algas, líquenes, musgos, hepáticas y hongos en diferente proporción, manteniendo una íntima asociación con las partículas del suelo, viviendo dentro o a milímetros por encima de la superficie (**Figura 1**) **Figura 1.** Diagrama esquemático de la costra biológica del suelo con organismos típicos Belnap. Extraído de: Belnap et al., 2001. Habitan regiones áridas y semiáridas en todo el mundo, en donde la vegetación vascular suele ser la ausente, cubriendo más del 70% de la superficie (Belnap *et al.*, 2001; Rosentreter *et al.*, 2007; Weber *et al.*, 2008).

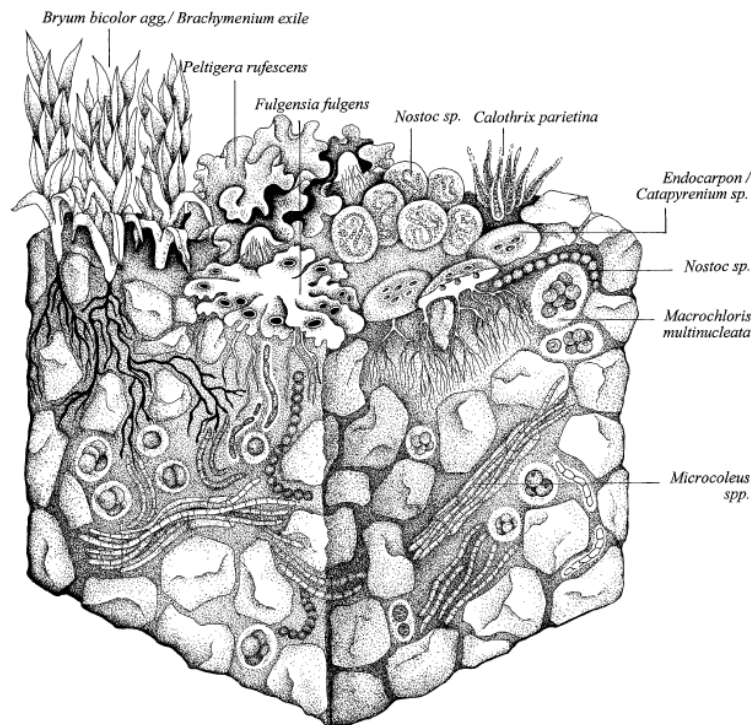


Figura 1. Diagrama esquemático de la costra biológica del suelo con organismos típicos Belnap. Extraído de: Belnap et al., 2001.

A lo largo del tiempo, la CBS ha sido descrita en la literatura bajo distintos nombres y terminologías. Las más usuales son: corteza criptogámica, corteza criptobiótica, corteza microfítica, corteza microfloral, corteza organogénica, corteza biogénica, y corteza microbiótica (citada en la literatura inglesa: cryptogamic, cryptobiotic, microphytic, microfloral, organogenic, biogenic, and microbiotic soil crust). Estas denominaciones fueron empleadas por diversos investigadores haciendo énfasis en el grupo de organismos estudiados. Actualmente se acepta el término costra biológica del suelo, ya que no excluye organismos como algas y hongos (Castillo-Monroy & Maestre, 2011; Chen *et al.*, 2005).

La influencia de las CBS en los ecosistemas desérticos promueve procesos de formación, estabilidad y fertilidad del suelo, evitando cualquier tipo de erosión, como el ocasionado por escorrentía o viento (Belnap *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2005). También se ha demostrado que participa tanto en la fijación del carbono como del nitrógeno, 3.9×10^{15} g (7%) y 49×10^{12} g (46%) respectivamente en todo el globo por año (Elbert *et al.*, 2012), permitiendo el abastecimiento y redistribución de nutrientes para la comunidad y el ecosistema (Belnap *et al.*, 2001; Ludwig *et al.*, 2005). Además, debido a su estructura morfológica las CBS influyen en los procesos del ciclo hidrológico como la infiltración, la retención del agua, la escorrentía y la producción de sedimentos, así como en la modificación de la tasa de evaporación y temperatura de la superficie (Belnap, 2006; Eldridge *et al.*, 2010; Kidron & Tal, 2002).

Asimismo, se encontró que las CBS interactúan notablemente con fauna y flora asociada del lugar debido a la modificación del sustrato, contenido de nutrientes, disponibilidad de agua y banco de semillas, así como también por suministrar fuentes de recursos y hábitat. Teniendo en cuenta lo anterior muchos autores consideran a las CBS como un ingeniero ecológico por el rol que cumple en los ecosistemas áridos (Arana *et al.*, 2015, Concostrina *et al.*, 2014, Eldridge *et al.*, 2010).

2.2. Revisión de la CBS en el Perú

El Perú presenta en su margen oeste una extensión de alrededor de 328093 km² (25.5% del total de su extensión) de ambientes áridos (Ministerio del Ambiente, 2012), lo que proporciona una alta oportunidad de encontrar considerable extensión de diversos tipos de CBS.

En efecto, la primera referencia en el Perú hecha para la CBS fue realizada por Ferreyra (1953), en donde describe como una comunidad criptogámica a aquella encontrada en la zona baja de la RN de Lachay, nombrándola “loma de Nostoc”. Más adelante, estudios realizados por Belnap *et al.* (2006) presentaron de manera general la extensión global de las CBS, en el cual se observan áreas dentro del Perú con características ambientales que propiciarían el desarrollo de éstas (Büdel, 2001). Posteriormente, Arana *et al.* (2016) registraron la presencia formal de CBS en el Perú en la Reserva Nacional de Lachay (**Figura 2.a**) describiendo también los tipos de CBS presentes por su composición biológica (CBS dominada por cianobacterias, CBS dominada por líquenes y CBS dominada por musgos). Registraron la presencia de CBS en varias zonas áridas como en Lomas de Supe y la Zona Reservada Lomas de Ancón (**Figura 2.b y 2c**); además de encontrar CBS en regiones como la Puna: Reserva Nacional de Junín (**Figura 2.d**). Logrando producir un mapa del territorio nacional con el área potencial de distribución de la CBS en el Perú. Luego, Rengifo (2017) estudió la importancia y el efecto de las perturbaciones naturales (biopedturbaciones) en la CBS y la interacción con la vegetación asociada de lomas.

En la actualidad las CBS en el Perú llevan siendo estudiadas por un equipo de investigación del departamento de Ecología del Museo de Historia Natural de la UNMSM liderado por el profesor César Arana, trabajándose en diversos aspectos desde los taxonómico, fisiológico, biogeográfico y ecológico.

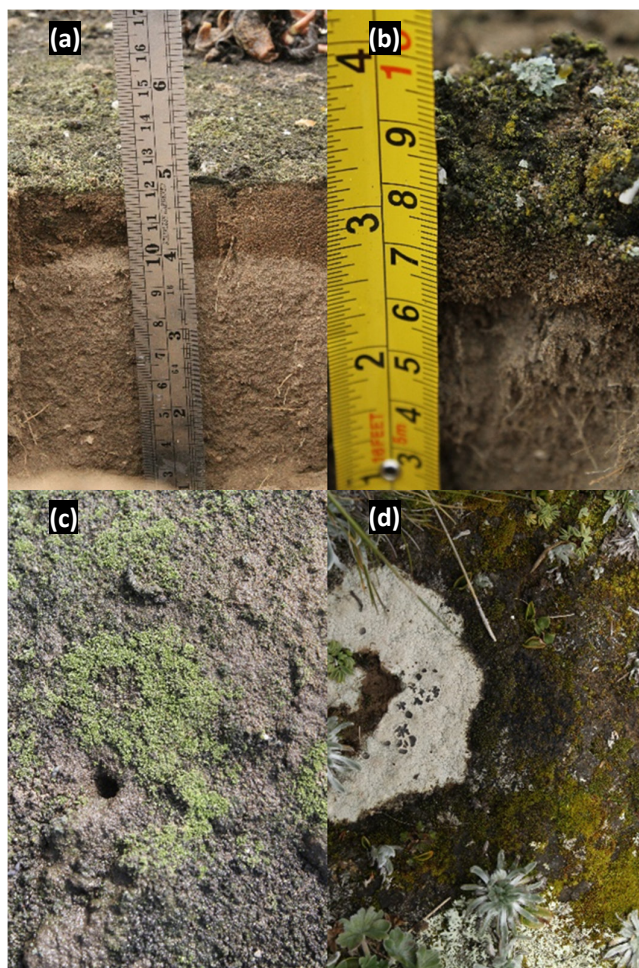


Figura 2. Costra biológica del suelo encontrado en diferentes lugares del Perú.

(a) Reserva Nacional de Lachay, **(b)** Lomas de Supe, **(c)** Zona Reservada Lomas de Ancón y **(d)** Reserva Nacional de Junín.

2.3. Sensoramiento remoto y las CBS

El uso del sensoramiento remoto para la detección y mapeo de las CBS fue implementado por primera vez por Wessels y Van Vuuren (1986), mediante el empleo de las bandas 4, 5 y 7 (correspondientes a la región verde, roja e infrarroja en el espectro electromagnético) del satélite Landsat 3 en el desierto de Namibia, África. Con estas bandas se diferenciaron áreas cubiertas de líquenes de superficies del suelo desnudo y vegetación.

Posteriormente O'Neill (1994) analizó y caracterizó el comportamiento de la energía reflejada y la firma espectral de la CBS de ambientes semiáridos en Australia. Encontró que, a diferencia del suelo desnudo, la CBS tiene una menor reflectancia en todo el espectro electromagnético, y que buena parte se debe a la presencia y actividad de los pigmentos fotosintéticos presentes, detectado entre los 600 y 700 nm del espectro electromagnético (Karnieli & Tsoar, 1995). Similares características espectrales fueron encontradas en otros lugares como Israel y Egipto (Karnieli & Tsoar, 1995) y en Burkina Faso (Tromp & Steenis, 1995). Además, dentro del rango espectral del infrarrojo cercano y de onda corta se reportó que existe diferenciación en los niveles de intensidad de energía reflejada de las CBS relacionado al nivel de desarrollo que presenta la CBS, siendo una relación inversa, demostrando la posibilidad de clasificar diferentes tipos de CBS (Karnieli *et al.*, 1999).

El estudio de las firmas espectrales de la CBS derivó en el desarrollo de diversos índices para detectar CBS. Así pues, Karnieli (1997) desarrolla el *índice espectral de costra* (CI¹) a partir de la propiedad encontrada de los pigmentos de ficobilina con respecto a la intensidad de energía reflejada en la región de la banda azul en el espectro electromagnético, el cual tiene como principal objetivo diferenciar áreas con presencia y ausencia de CBS. Originalmente se implementó para la detección de CBS en el desierto de Negev, Israel. Este índice consta de la diferencia normalizada de las bandas pertenecientes de la región roja y azul en el espectro electromagnético:

$$CI = 1 - \frac{ROJO - AZUL}{ROJO + AZUL}$$

Por otro lado, Chen *et al.* (2005) desarrollaron el *índice de la costra biológica del suelo* (BSCI²) a partir de las propiedades presentes tanto en la región visible (azul, verde, rojo) en el cual la CBS tiene un comportamiento particular diferente al suelo desnudo y a las áreas con abundante vegetación, presentando un bajo nivel de energía reflejada. De

¹ CI: Crust Index (Karnieli, 1997)

² BSCI: Biological Soil Crust Index (Chen *et al.*, 2005)

manera similar ocurre en la región infrarroja, donde corresponde al nivel de desarrollo que presenta la CBS, es decir, menor energía reflejada en esta región, mayor desarrollo de la CBS. Implementado para la detección de CBS en el desierto de Gurbantunggut, China, el índice propuesto es:

$$BSCI = \frac{1 - L \times |ROJO - VERDE|}{media(ROJO, VERDE, IRCERCANO)}$$

En donde la diferencia de las bandas pertenecientes a la región roja y verde es multiplicada por un parámetro de ajuste L (cuyo valor varía entre 2 y 4), amplificando esta diferencia. El principal objetivo de este índice es diferenciar de manera exagerada las áreas con presencia CBS, áreas del suelo desnudo y áreas con abundante vegetación, enfocado a las CBS dominada por líquenes.

Más adelante, nuevas técnicas implementadas para la detección y clasificación de las CBS fueron propuestas a partir del uso de algoritmos de clasificación en imágenes satelitales hiperespectrales. Modelos producidos a partir de algoritmos basados de árbol de decisión: *algoritmo de identificación de costras de remoción continua* (CRCIA³) y el *índice de desarrollo de costra* (CDI⁴), así como modelos producidos a partir de algoritmos de aprendizaje supervisado como las máquinas de vector soporte (SVM⁵). Tanto el CRCIA propuesto por Weber *et al.* (2008) y el CDI propuesto por Chamizo *et al.* (2012) toman como base el método de *remoción continua* (CR⁶), en donde de acuerdo a la información de sus características espectrales, se extrajeron, analizaron e identificaron las superficies con presencia de CBS (Rodríguez-Caballero, *et al.*, 2017). El CRCIA tiene como objetivo discriminar áreas cubiertas por CBS de las áreas del suelo desnudo, vegetación y roquedales, siendo implementado en Succulent Karoo, Sudáfrica. El CDI además de diferenciar áreas cubiertas por CBS de áreas del suelo desnudo y vegetación, permite la identificación y clasificación de diferentes tipos de CBS de

³ CRCIA: Continuum Removal Crust Identification Algorithm (Weber *et al.*, 2008)

⁴ CDI: Crust Development Index (Chamizo *et al.*, 2012)

⁵ SVM: Support Vector Machine (Vapnik, 2005)

⁶ CR: Continuum removal (Clark y Roush, 1984)

acuerdo a su componente dominante: CBS dominada por cianobacterias, CBS dominada por liquen y musgo y CBS dominada por musgo, habiendo sido implementado en el Desierto Tabernas y en el Parque Natural Cabo de Gata-Níjar, al sur de España. Luego, Rodríguez-Caballero *et al.* (2014) logran mediante el uso de SVM diferenciar áreas cubiertas por CBS de las áreas del suelo desnudo y vegetación, pudiendo además identificar y clasificar CBS dominada por cianobacterias y CBS dominada por liquen, implementándolo en el Desierto Tabernas, España.

III. OBJETIVOS

3.1. GENERAL

- Determinar los tipos de costra biológica del suelo presente en la Reserva Nacional de Lachay y su distribución a partir del uso de imágenes satelitales y evaluación en campo.

3.2. ESPECÍFICOS

- Identificar y describir los tipos de CBS en la Reserva Nacional de Lachay
- Identificar y describir las firmas espectrales de los CBS presentes en la Reserva Nacional de Lachay.
- Determinar las áreas cubiertas por CBS en la Reserva Nacional de Lachay.
- Identificar y clasificar los distintos tipos de CBS en la Reserva Nacional de Lachay en base a la combinación de imágenes de sensores multiespectrales y a su entorno asociado.
- Generar cartografía de las CBS presentes en la Reserva Nacional de Lachay.

IV. HIPÓTESIS

- H0: Es posible obtener una clasificación robusta de los diferentes tipos de CBS presentes en la Reserva Nacional de Lachay y generar un mapa de distribución y estimar su extensión en base al análisis multiespectral de imágenes satelitales.
- H1: No es posible obtener una clasificación de los diferentes tipos de CBS presentes en la Reserva Nacional de Lachay y generar un mapa de distribución y estimar su extensión en base al análisis multiespectral de imágenes satelitales.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. AREA DE ESTUDIO

5.1.1. Reserva Nacional de Lachay

La Reserva Nacional de Lachay es un ecosistema desértico ubicado en la costa central del Perú, en el distrito de Huacho, provincia de Huaura entre las coordenadas geográficas S11°20'48" y W77°19'45", a 105 km al norte de la ciudad de Lima (**Anexo I, Figura 4**), ocupando una extensión aproximada de 5070 hectáreas (50.7 km²) y declarado Reserva Nacional en 1977 mediante Decreto Supremo N°370-77-AG (Cano *et al.*, 1999; SERNANP, 2013).

Alejada de la línea costera por aproximadamente 7 km desde su punto céntrico, posee una fisiografía muy variada con altitudes desde los 100 a 750 m y elementos fisiográficos como: cumbres y mesetas, afloramientos rocosos y depósitos eólicos (INRENA, 2002).

El área presenta las zonas de vidas de Desierto Superárido Subtropical (ds-S), Desierto Perárido Montano Bajo Subtropical (dp-MBS) y Desierto Desechado Subtropical (dd-S) (INRENA, 1994), con temperatura máxima al mes de marzo con 21.6°C y mínima al mes de agosto con 13.3°C, y precipitaciones máximas en los meses de agosto y setiembre con registros de 31.3 mm y mínimas en el mes de febrero con 1.13 mm (Ordoñez & Faustino, 1983).

La RN de Lachay alberga en su mayor extensión *las lomas*, una particular formación vegetal altamente estacional dependiente de la condensación de la niebla que se desarrolla contra las laderas de pequeñas montañas aisladas o en laderas muy empinadas (**Figura 3**). La composición y distribución de especies en las lomas suele estar caracterizada en zonas muy distintivas controladas por la estructura del hábitat, humedad disponible y la competencia (Pinto *et al.*, 2006; Rundel *et al.*, 1991). Así pues,

durante los eventos extremos de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)⁷, tanto en la fase cálida (El Niño) como en la fase de enfriamiento (La Niña), provoca situaciones de alta perturbación provocando cambios en la composición comunitaria del lugar (Dillon & Rundel, 1990).

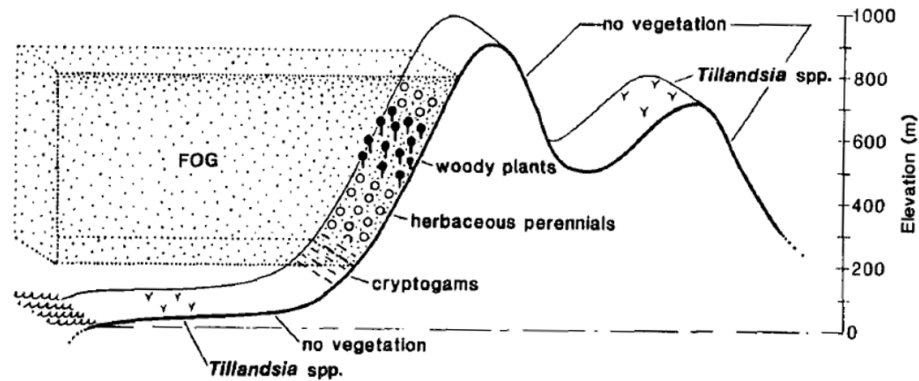


Figura 3. Representación gráfica de la loma y su zonificación de la vegetación.

(Tomado de Ellenberg, 1959)

⁷ En la literatura inglesa como: El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

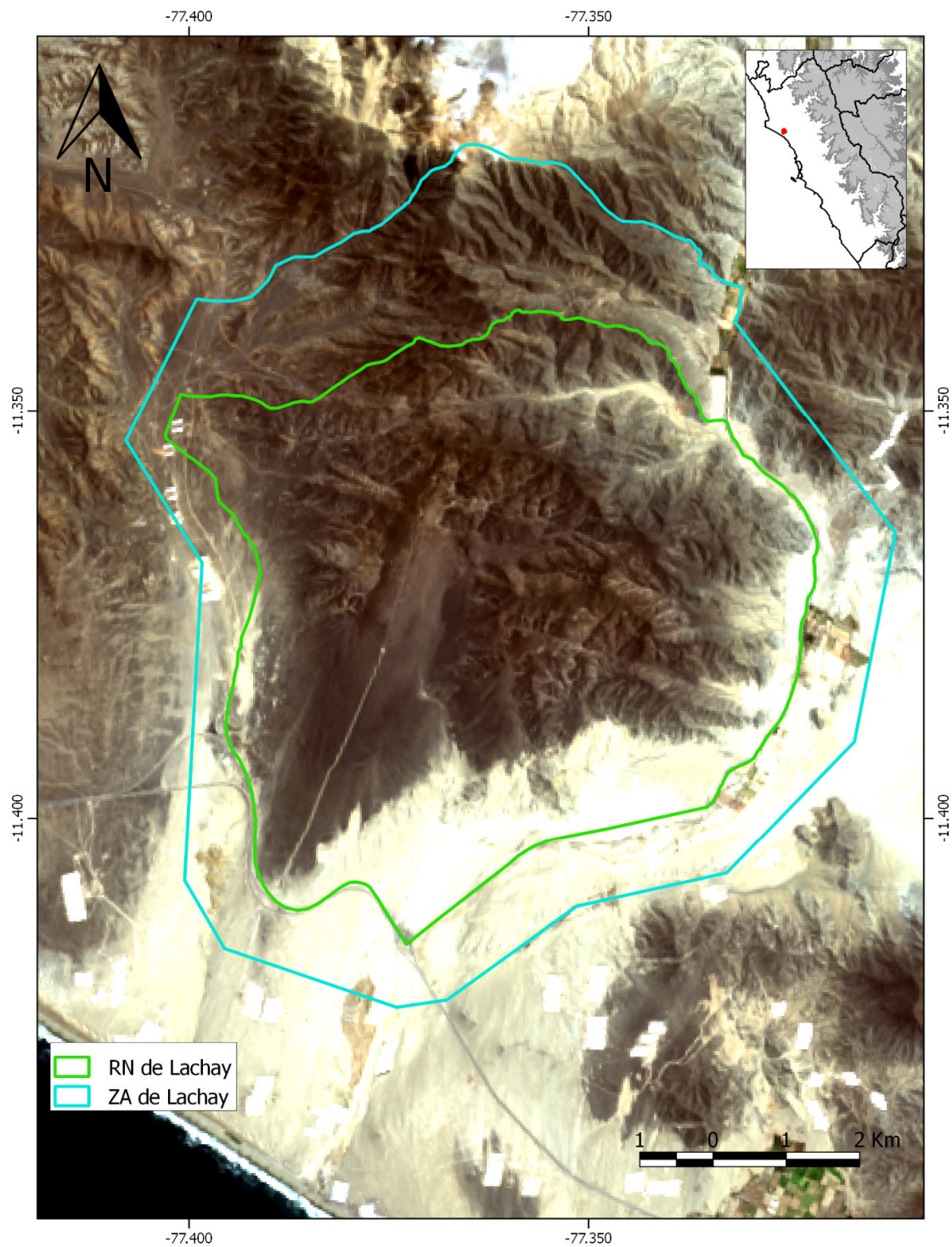


Figura 4. Ubicación de la Reserva Nacional de Lachay.

RN: reserva nacional. ZA: zona de amortiguamiento

5.2. MATERIALES

5.2.1. De Campo

Tanto para la exploración preliminar de la zona como en la decisión sobre la ubicación de los transectos y las parcelas, se utilizó un GPS Magellan Mobile Mapper™ CX GPS con precisión submétrica (0.20 m) con el fin de obtener de manera más precisa la ubicación de los lugares a instalarse las parcelas de evaluación. Se comenzó realizando en más de una ocasión caminatas exploratorias en gran parte de la extensión de la Reserva Nacional con el fin de obtener una amplia visión paisajística del lugar y determinar los lugares en donde se instalarán los transectos, que para un mejor espectro de las superficies a clasificar (Arena, CBS y Vegetación) se dio énfasis en aquellos lugares con una marcada gradiente lineal. Para la instalación de los transectos, parcelas y subparcelas se necesitaron de cintas métricas y de un Marco de tubos PVC ½" de 1 x 1 m. Toda información obtenida fue anotada en una libreta de apuntes, y también fue llevado a cabo registros macrofotográficos en campo con un anillo inversor de lente para una cámara réflex Canon Rebel T3. En algunos casos fue necesario el uso de agua para estimular y “despertar” la costra con el fin de poder apreciarla de una mejor manera.

5.2.2. Procesamiento informático

Las imágenes satelitales multiespectrales Landsat 8 OLI/TIRS fueron descargadas a través del portal web EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov/) desarrollado por United States Geological Survey.

Para el procesamiento de la información se usaron los softwares Microsoft Excel®. El análisis de las imágenes satelitales fue realizado en Quantum GIS 2.18.18 “Las Palmas” en conjunto con GRASS GIS 7.0.5. y para el análisis estadístico, manipulación de datos y gráficos fue usado R 3.3.2 con el interfaz de usuario RStudio 0.99.

5.3. MÉTODOS

5.3.1. Identificación de las CBS en la R.N. de Lachay

5.3.1.1. Exploración del territorio y la presencia de CBS

Debido a la gran extensión que presenta la Reserva Nacional, planificar y determinar el área en donde se realizaría la evaluación se llevó como primer paso. Mediante el uso de Google Earth, se examinaron y ubicaron áreas potenciales para la evaluación, incluyendo sus rutas de acceso. Posteriormente, se realizaron caminatas exploratorias con el fin de encontrar áreas con mayor extensión de suelo cubierto por CBS. La caracterización de las CBS presente en Lachay, se basó a partir de clasificaciones realizadas por Belnap *et al.* (2001, 2008), Williams *et al.* (2012, 2013) y Rosentreter *et al.* (2007). Al igual que en sus trabajos, se tomaron la presencia de los componentes biológicos a nivel de grupo funcionales combinados con la morfología de la superficie, como la coloración e intensidad de aspereza (**Anexo II, Anexo III**). Toda esta actividad fue registrada con ayuda de un GPS tomando puntos de referencia y registrando todo el recorrido.

5.3.1.2. Obtención de datos en campo

Una vez realizada la fase exploratoria, se tomó en cuenta la dirección de transectos los cuales debían seguir una gradiente en base a la composición biológica de la superficie. El trabajo de campo se realizó en el mes de abril del año 2015 durante la época seca. Se evaluaron dos transectos cuyo gradiente representaba la transición de las superficies cubierta por arena, pasando por superficies cubierta de CBS y hasta llegar a las superficies cubiertas por vegetación vascular. Con el fin de uniformizar la información en campo con las imágenes satelitales, para el diseño de las parcelas se tomaron las dimensiones 30 x 30 m, dentro de las cuales se instalaron cinco subparcelas de 1 x 1 m (**Figura 5**), las cuales fueron distribuidas equidistantemente (cuatro ubicadas en cada extremo de la parcela y una al centro). Esta decisión fue tomada para poder homogeneizar la información presente dentro de cada parcela. Siendo un total de 172

parcelas de 30 x 30 m, ocupando 900 m² y ubicadas de manera continua a lo largo de los transectos cada 30 m. Este diseño está relacionado a las dimensiones y ubicación de cada pixel presente en las imágenes satelitales (Resolución espacial: 30 x 30 m). En síntesis, por cada pixel presente en las imágenes satelitales, le correspondía una parcela, compuesta por cinco subparcelas.



Figura 5. Diseño las parcelas de 30 x 30 m utilizada en el experimento, nótese la ubicación de cada subparcela de 1 x 1 m ubicada dentro de ella.

Para realizar el análisis correspondiente a la cobertura sobre la superficie presente en la parcela, se utilizaron proporciones de área cubierta determinado por grupos funcionales, en la escala del 0 - 1.0, donde 1.0 representa el 100% de cobertura: arena, alga, musgo, liquen, materia orgánica vegetal. Para medir la resistencia a la penetración, se utilizó un penetrómetro modelo pistón de bolsillo en unidades de kg/cm², siendo 4.5 kg/cm² el valor máximo que se puede registrar. Por último, se utilizó un GPS Garmin para el registro de la altitud respecto al nivel del mar en cada una de las subparcelas. Se llevaron a cabo un total de 172 parcelas distribuidas en los dos transectos (**Figura 6**).

Los datos obtenidos de la altitud y resistencia mecánica a la penetración fueron considerados como independientes. Previamente se evaluaron en cada uno de los casos la normalidad del conjunto de datos obtenidos (Shapiro-Wilk) con el fin de decidir que prueba paramétrica o no-paramétrica utilizar. Dependiendo de esto, se utilizará la prueba paramétrica ANOVA (Analysis of variance/Análisis de la varianza), o la prueba no-paramétrica Kruskal-Wallis con sus respectivas pruebas post-hoc con el fin de probar si existe alguna diferencia significativa entre los distintos tipos de CBS por sus características evaluadas.

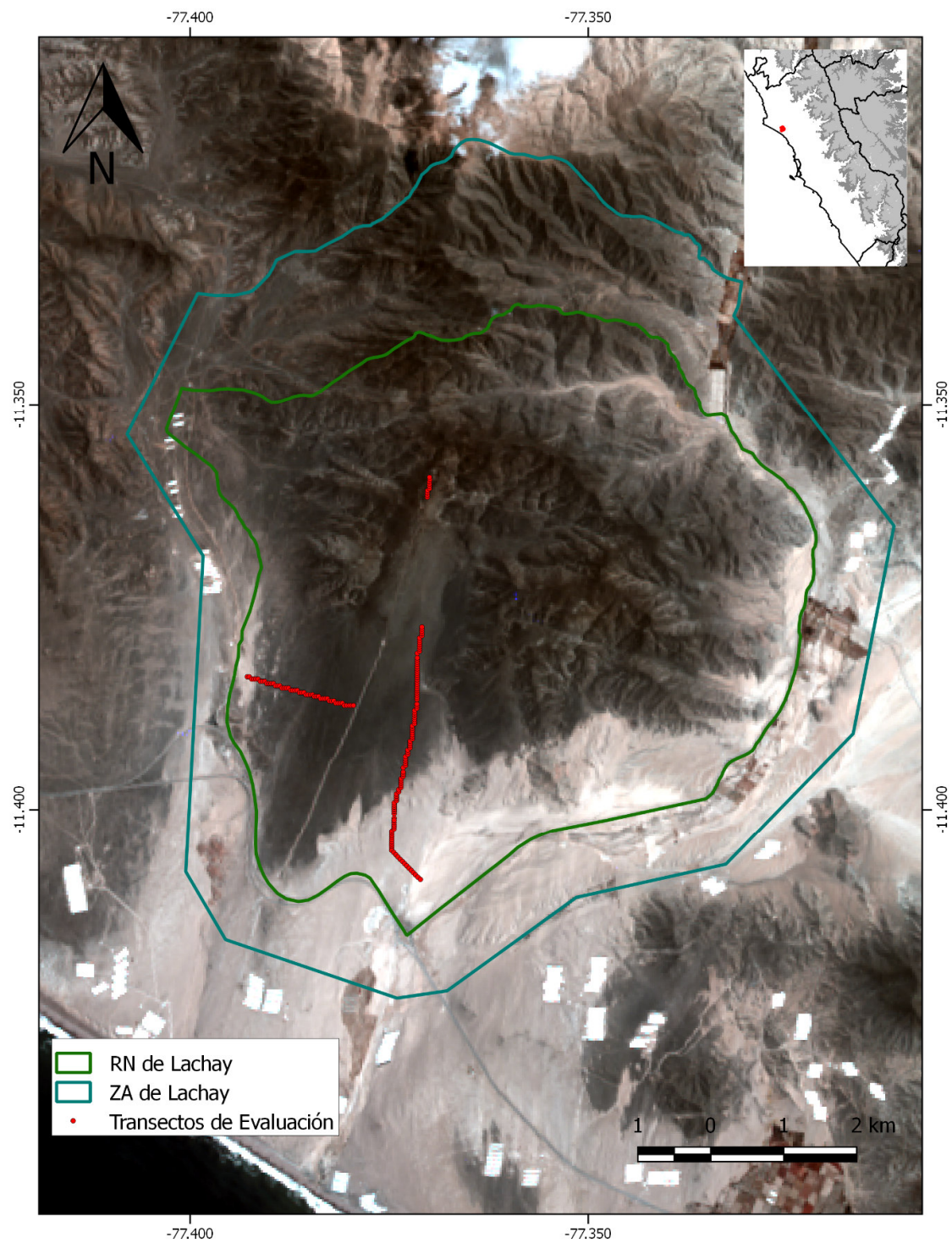


Figura 6. Ubicación de los transectos en donde se colocaron las parcelas. RN: Reserva Nacional de Lachay. ZA: zona de amortiguamiento de la reserva.

5.3.1.3. Técnica de Escalamiento multidimensional

El ordenamiento es un método cuantitativo de análisis multivariado usado en la ecología para visualizar y realizar un análisis de datos exploratorio representando las relaciones de muestras y de especies en la comunidad, entender la estructura de ésta y relacionar su variación con los gradientes ambientales lo más fiel posible en un espacio de baja dimensión (Clarke, 1993; Gauch & Gauch, 1982). Dentro del ordenamiento existen diversas técnicas. Una de ellas es el Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS⁸). A diferencia de otras técnicas de ordenamiento que se basan a distancias entre las muestras (como el Análisis de Componentes Principales), NMDS maximiza la correlación del orden clasificado o rank order (Dixon, 2003; Gauch & Gauch, 1982), dicho en otro modo, la magnitud de distancias dentro de la base de datos es sustituido por orden de similitud y disimilitud evaluado por el nivel de estrés.

El análisis se realizó con el software R 3.3.2 utilizando el paquete *vegan* (Oksanen *et al.*, 2013). La información utilizada fue una matriz en donde cada parcela presenta la información por componente biológico (grupos funcionales) junto con las variables altitud y resistencia mecánica a la penetración (**Anexo IV**). Como resultado se presenta el nivel de estrés el cual mide la relación entre las distancias de disimilitud de las comunidades evaluadas descrito en la base de datos (matriz: **Anexo IV**) y las distancias de disimilitud en el ordenamiento generado.

5.3.2. Distribución de las CBS en la R.N. de Lachay

5.3.2.1 Información Multiespectral

Se utilizaron las imágenes multiespectrales del satélite Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) descargadas desde el servidor EarthExplorer-USGS (USGS, 2015). Las imágenes revisadas fueron obtenidas entre los meses de enero - marzo del 2015, exclusivamente en la época seca debido a la baja nubosidad

⁸ NMDS: Non-Metric Multidimensional Scaling

presente en el ambiente, permitiendo obtener imágenes con una cobertura de nubes menor al 10%. Se seleccionó y descargó la imagen “LC80080682014113LGN00” (8/68) adquirida el día 25 de marzo del 2015.

5.3.2.2. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Antes de poder analizar las imágenes, estas deben pasar por procesos de calibración y corrección atmosférica. Las imágenes de Landsat 8 obtenidas a primera instancia son de Nivel 1 cuya información presente se encuentra en niveles digitales, las cuales son valores tomados por el sensor de acuerdo a su resolución radiométrica de 8 bits (0-256). Estos Niveles Digitales deben ser transformados a niveles de reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmósfera (TOA) con el fin de obtener valores de intensidad de energía reflejada por la superficie. Para disminuir los efectos de dispersión o absorción causados por la presencia de partículas suspendidas en la atmósfera se procedió a realizar inmediatamente la corrección atmosférica mediante el método de sustracción de cuerpos oscuros (DOS1, dark-object subtraction) propuesto por Chavez (1996) para obtener valores de reflectancia de la superficie (Chander *et al.*, 2009, Wegmann *et al.*, 2016). Todo esto se llevó a cabo utilizando el software QGIS 2.18.18.

5.3.2.3. Extracción de la información de las áreas de interés e Identificación de las firmas espectrales

Al obtener una imagen con corrección atmosférica, se extrajeron los valores de reflectancia por banda de cada pixel correspondiente a las parcelas evaluadas en campo. En total se extrajo la información de 172 píxeles (**Tabla 1**). Esta información fue introducida en una matriz y posteriormente mediante el uso de estadísticos paramétricos y no-paramétricos se determinaría si el rango de energía reflejada por superficie en cada banda tendría diferencia significativa con límites bien marcados.

5.3.2.4. Clasificación de las imágenes satelitales

Previamente antes de comenzar el proceso de clasificación la base de datos se repartió en dos bases de datos. Cada base de datos presentó el mismo número de píxeles de tipo de CBS registrado y repartidos de manera aleatoria. La primera base de datos, denominada *Base de datos de entrenamiento*, compuesta por un total de 101 píxeles fue aquella que se utilizó para que el algoritmo de aprendizaje supervisado evalúe y produzca un modelo predictivo. En cambio, la segunda base de datos, *Base de datos de prueba*, compuesta por 71 píxeles fue aquella que se utilizó para contrastar y validar la precisión del modelo generado. En la **Tabla 1** se observan las bases de datos con su respectivo número de píxeles.

Tabla 1. Base de datos empleado para generar el modelo predictivo.

SUPERFICIE	n° Total de píxeles	Píxeles de entrenamiento	Píxeles de prueba
ARENA	20	20	
CBS LC	20	10	10
CBS LO	20	10	10
CBS R	46	23	23
CBS R MO	30	15	15
CBS R VEG	26	13	13
VEGETACIÓN	10	10	
Total	172	101	71

El algoritmo usado para la clasificación de las CBS en las imágenes satelitales fue *Random Forest* (RF). RF es una técnica de máquina de aprendizaje supervisado del tipo método basado en árboles. RF parte del ensamble de varios *Árboles de decisiones* (AD), siendo otra técnica de máquina de aprendizaje el cual construye un modelo en base al mejor y/o más recurrente atributo (variable) para clasificar tomando todos los atributos de la base de datos. El problema con los AD es la tendencia a presentar sobreajuste en el modelo generado, esto quiere decir, habría mayor tendencia a que el modelo ajuste perfectamente los datos de entrenamiento provocando que sea impreciso

en la predicción al momento que se evalúe nueva información no entrenada (alta precisión en los datos de entrenamiento, pero baja precisión en los datos de prueba) (James *et al.*, 2013).

Es en este punto en donde RF saca ventaja ya que al ser un ensamble de modelos que de manera independiente no presentan una gran precisión, en conjunto forman un modelo robusto. RF construye una serie de AD tomando los atributos (variables) de manera aleatoria dependiendo del número de variables (m) para realizar una decisión (Breiman, 1996; 2001), clasificándose en tres métodos:

- Método *selección de una sola variable de manera aleatoria*: $m = 1$
- Método *Bagging de Breiman*: $m = p$ (donde: p =número total de variables)
- Método *Random Forest de Breiman*: $m = \sqrt{p}$

Para comprobar cuál de estos métodos produce un mejor modelo RF, se utilizó *Validación-Cruzada*⁹, una técnica que permite garantizar que la partición de datos en entrenamiento y prueba es independiente y no presenten mucha variabilidad. Además de obtener información anticipada del modelo potencial como el preámbulo para el modelo final, así como su precisión e índice Kappa (James *et al.*, 2013). El método consistió en dividir la *base de entrenamiento* en 10 (K) particiones en mismas dimensiones. Extrayéndose la primera partición como datos de *prueba* y el resto de particiones ($K-1$) tomado como *entrenamiento*. Éste proceso fue repetido 10 veces, y en cada caso distinta partición es tomado como *entrenamiento*. Finalmente, agrupada cada partición de prueba por cada repetición en una misma base, se procedió a evaluar los RF en base al parámetro m .

Una vez elegido el modelo con el mejor parámetro de número de variables elegidos de manera aleatoria m para tomar decisión, se entrenó el algoritmo RF con la base total de

⁹ En la literatura inglesa como: Cross-Validation.

entrenamiento. Obtenido el algoritmo entrenado en un modelo, se procedió a clasificar las imágenes satelitales, generándose un mapa con la extensión de los tipos de CBS presentes en la RN de Lachay. Se realizaron análisis complementarios con el fin de hallar qué bandas son las más importantes para la clasificación de las CBS, a partir de imágenes satelitales. Los análisis realizados fueron: la disminución de la precisión en la clasificación por ausencia y la disminución de la pureza en la decisión (índice Gini) por ausencia.

5.3.2.5. Procesamiento Post-Clasificación

Una vez obtenida la imagen clasificada, se realizaron refinamientos post-clasificación con el fin de reducir errores causados por píxeles aislados o mal clasificados (Yuan *et al.*, 2005). Esto limpia la imagen de ruido provocado por estos píxeles mejorando la calidad de la imagen clasificada. Primero se utilizó la técnica de filtrado para eliminar los píxeles que provocan ruido, tomando por umbral (número mínimo de píxeles agrupados a filtrar) el valor de 4. Por cada uno de éstos píxeles a filtrar, se toman los valores de los 4 píxeles más cercanos y el valor de este píxel es reemplazado por aquel valor con mayor frecuencia. Luego se aplicó la técnica de dilatación con el fin de suavizar los bordes irregulares de las clases. En este caso por cada píxel de la imagen, se tomaron los valores de los ocho píxeles más cercanos y el valor del píxel la toma la moda.

5.3.2.6. Precisión de la Clasificación

Para validar la clasificación se implementó una *matriz de confusión*, la cual evalúa la precisión global de la clasificación y también identifica los errores específicos que afectan las categorías de manera individual (precisión de productor y precisión de usuario). La matriz de confusión compara la información de referencia obtenida en campo de cada píxel de prueba (*Base de datos de prueba*) y el resultado obtenido al pasar por la clasificación (Canter. 1997; Hay, 1988). Además, se complementó el análisis mediante el *índice Kappa*.

Precisión Global: o precisión general, es la estadística descriptiva más simple y se obtienen dividiendo el número de píxeles de prueba correctamente clasificados en el modelo entre el número total de píxeles de todo el conjunto (Congalton, 1991).

Precisión de Productor: esta medida de precisión indica la probabilidad que tiene un pixel de prueba ser correctamente clasificado en su categoría que le corresponde. Se obtiene al dividir el número de píxeles de prueba clasificados correctamente pertenecientes a una categoría entre el número total de pixel de prueba que pertenecen a dicha categoría (Congalton, 1991).

Precisión de Usuario: esta medida de precisión indica la probabilidad que tiene un pixel clasificado en determinada categoría en representar la categoría real en campo. Se obtiene al dividir el número de píxeles de prueba clasificados correctamente pertenecientes a una categoría entre el número de píxeles de prueba que fueron clasificados para esa categoría (Story & Congalton, 1986).

Índice Kappa: Es una técnica multivariada discreta desarrollada por Landis & Koch (1977), e introducida en el sensoramiento remoto como análisis complementario a la matriz de confusión por Congalton *et al.* (1983). Esta técnica determina si el nivel de concordancia que hubiera entre la clasificación efectuada y la realidad es significativa tomando valores entre el 0 y el 1. Valores cercanos a 1 indican un fuerte grado de concordancia, a diferencia de valores cercanos a 0 que indican que todo se debe al azar.

5.3.2.7. Cuantificación de la cobertura de CBS en la R.N.

Una vez obtenido el mapa generado a partir de la clasificación, se agruparon los píxeles de la misma categoría y se cuantificaron. Finalmente se multiplicó cada valor por 0.0009 km², siendo el área real que ocupa un pixel para poder estimar la extensión de las CBS.

VI. RESULTADOS

6.1. Caracterización de la CBS mediante el uso del escalamiento multidimensional no métrico

Durante la fase exploratoria, se observaron superficies de CBS en toda la RN con aspecto y características particulares diferenciales (**Figura 7**).

Se realizó la descripción del componente biológico a nivel de grupos funcionales en conjunto con la morfología de la superficie, como la coloración e intensidad de aspereza. Para detectar la presencia de musgos y líquenes se realizaron observaciones en campo y complementado con macrofotografías, habiéndose encontrado e identificado: individuos del filo Bryophyta, y los líquenes *Chrysothrix* sp., *Caloplaca* sp. entre las más comunes. En el caso de corroborar la presencia de algas en la costra, se extrajeron muestras y se realizó la identificación microscópica complementaria llevada a cabo por Cisneros & Arana (2016), donde se registró la presencia de: *Microcoleus vaginatus*, *Oscillatoria* sp., *Phormidium* sp, *Chlorella* sp., entre otras (**Figura 8**).

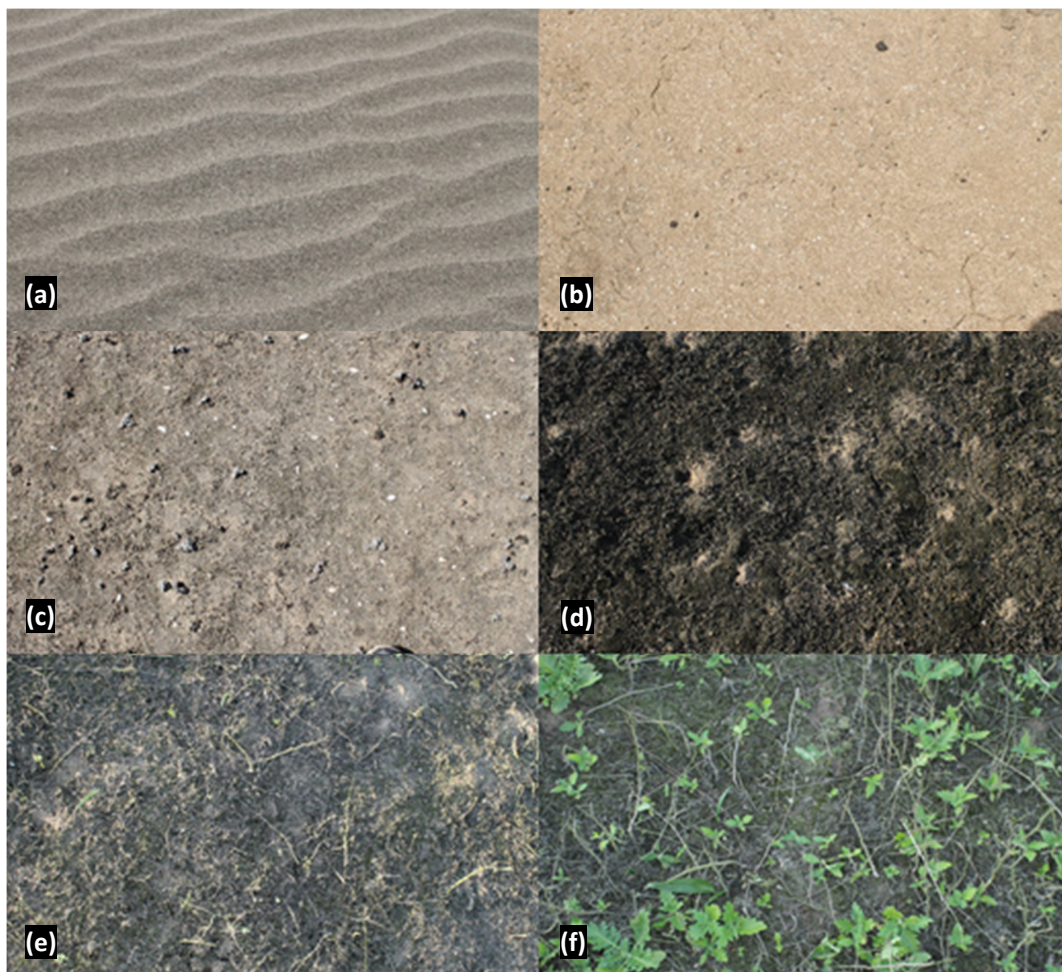


Figura 7. Tipos de Costra Biológica del Suelo encontrados en la Reserva Nacional de Lachay. **(a)** Arena, **(b)** CBS Lisa Clara, **(c)** CBS Lisa Oscura, **(d)** CBS Rugosa-Ondulante, **(e)** CBS Rugosa con abundante Materia Orgánica y **(f)** CBS Rugosa con vegetación persistente.

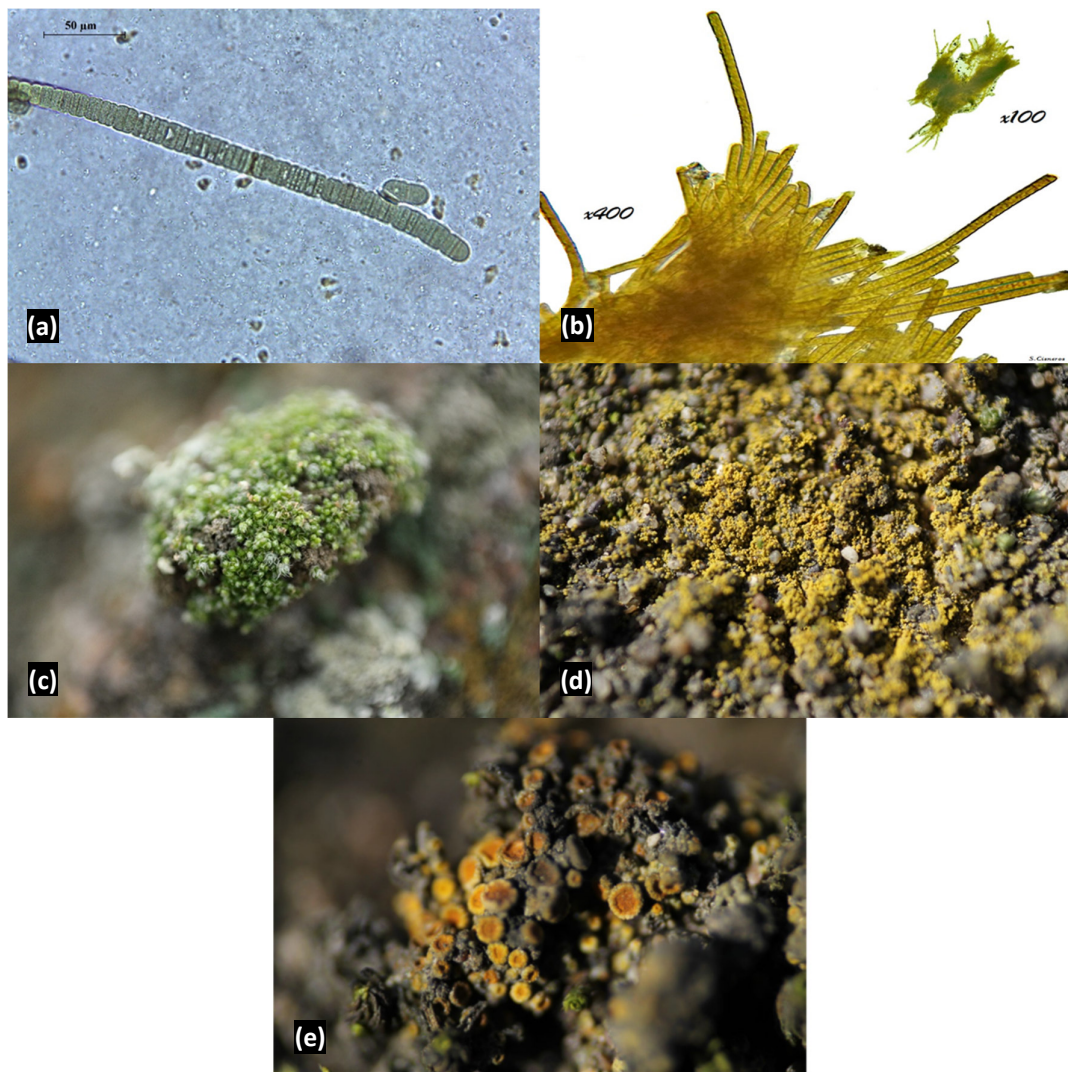


Figura 8. Distintos componentes biológicos encontrados en la CBS. **(a)** *Oscillatoria* sp.; **(b)** *Microcoleus vaginatus*; **(c)** Bryophyta; **(d)** *Chrysothrix* sp.; **(e)** *Caloplaca* sp.

6.1.1. Evaluación de la composición comunitaria de la CBS en la R.N. de Lachay

En la **Tabla 2** se observa la clasificación de CBS planteada para la RN, siendo un total de cinco tipos diferentes de CBS: costra biológica del suelo lisa clara (CBS LC), costra biológica del suelo lisa oscura (CBS LO), costra biológica del suelo rugosa-ondulante (CBS R), costra biológica del suelo rugosa con materia orgánica (CBS RMO) y costra biológica del suelo con vegetación persistente (CBS RVEG).

Tabla 2. Tipos de Costra Biológica del Suelo identificados en la Reserva Nacional de Lachay.

Morfotipo	Apariencia	Grupo de organismos dominantes	Descripción
CBS LC	Lisa Clara	Cianobacteria	CBS de aspecto liso y frágil al paso. Coloración clara, ligero contraste con respecto a la arena. Dominado enteramente por cianobacteria y presencia de arena suelta. Menor presencia de bioperturbaciones por área.
CBS LO	Lisa Oscura	>50% Musgo, Cianobacteria	CBS de aspecto liso y frágil, pero más resistente que LC. Coloración oscura, muy contrastante con respecto a la arena y LC. Dominado por musgo y presencia de cianobacteria. La presencia de bioperturbación es más recurrente.
CBS R	Rugosa-Ondulante	>50% Musgo, Liquen	CBS de aspecto rugoso y continuo, muy resistente al paso. Coloración mucha mas oscura que LO. Dominado por musgo con presencia de liquen y cianobacteria. Alta densidad de bioperturbaciones por área.
CBS RMO	Rugosa con Materia Orgánica	>50% Musgo, materia orgánica	CBS de aspecto rugoso con ondulaciones provocados por fragmentación vegetal, menor resistencia al paso que la R. De coloración oscura. Dominado por musgo con mayor presencia de materia orgánica. La materia orgánica son los restos de vegetación desarrollada en la época húmeda. Considerable densidad de bioperturbacion por área.
CBS RVEG	Rugosa con Vegetación persistente	>50% materia orgánica	CBS de aspecto rugoso con ondulaciones provocado por fragmentación vegetal, menor resistencia al paso que la R. De coloración oscura. Dominado por materia orgánica vegetal y musgo. La materia orgánica es vegetación persistente. Considerable densidad de bioperturbacion por área.

Toda la información obtenida de cada una de las parcelas evaluadas por la cantidad de cobertura presente de grupos funcionales fue ingresada en una matriz teniendo en cuenta los intervalos del 0.0 al 1.0, en donde 1.0 representa el 100 por ciento de superficie cubierta. En el gráfico de barras (**Figura 9**) se puede observar los porcentajes de cobertura en cada una de las parcelas evaluadas por grupo funcional.

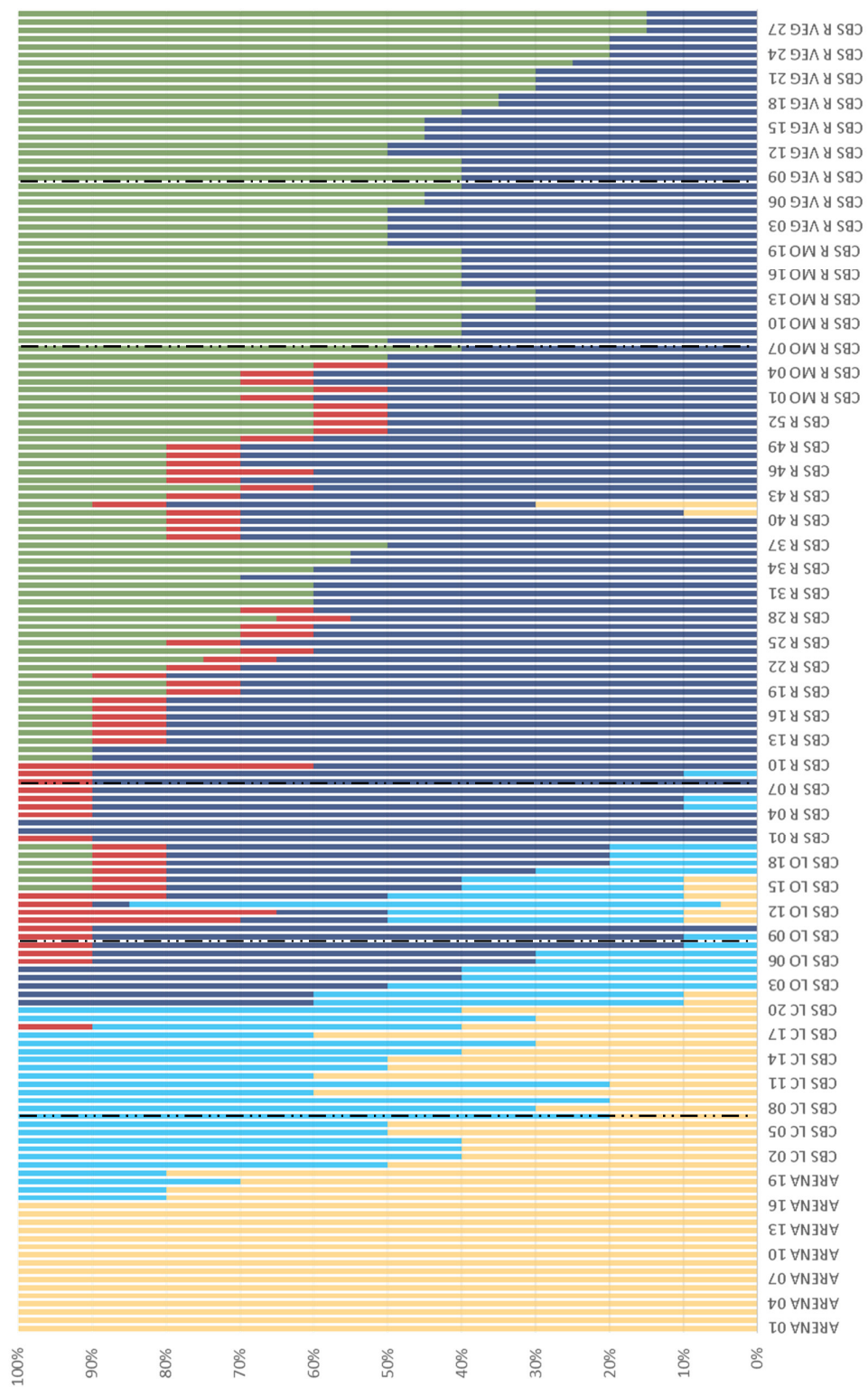


Figura 9. Gráfico de barras de la cobertura presente en las parcelas por tipo de CBS.

6.1.2. Variación de la altitud a la que se desarrolla y resistencia a la penetración de la CBS en la R.N. de Lachay

Debido a que un buen número de grupos descarta la hipótesis nula de normalidad (**Anexo VII**) se procedió a utilizar pruebas no paramétricas, en este caso la prueba Kruskal-Wallis y posteriormente la prueba U Mann-Whitney para dos muestras independientes (que sería la versión no paramétrica de t-test), con el fin de demostrar que hay diferencia entre grupos de rangos (variable vs. tipos de costra) y que esta diferencia sea estadísticamente significativa y no se deba al azar (Mann & Whitney, 1947). Esta prueba nos permite tanto probar si existe diferencia significativa de las medias y la distribución muestral de los tipos de CBS, con el fin de encontrar la tendencia central y la medida de dispersión a través del rango intercuartil.

En la **Tabla 3** y **Figura 10** se observa el rango de altitud a la cual cada uno de los tipos de costra biológica del suelo se desarrolla en la RN de Lachay. De todas las pruebas pareadas realizadas: entre la CBS LC y la CBS LO, al igual que entre la CBS RMO y la CBS RVEG los valores de sus p-values son mayores a 0.05, siendo la diferencia no significativa.

Tabla 3. Prueba de Kruskal-Wallis y medida de tendencia central y de dispersión a la altitud (m) donde se desarrolla cada tipo de costra biológica del suelo.

Prueba U Mann-Whitney (Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) para dos muestras independientes.

Kruskal-Wallis :

Ji-cuadrado	Prob > Ji-Cuadrado
136.584	<.0001

Mediana (Rango Intercuartil)

Altitud	
ARENA	116 (96.25 - 120.25)
CBS LC	146.5 (131 - 165)
CBS LO	154.5 (124.5 - 186)
CBS R	201 (168.5 - 213.75)
CBS R MO	236 (232.25 - 261.25)
CBS R VEG	247.5 (241 - 259.5)

U Mann-Whitney :

SUPERFICIES	p - value
ARENA - CBS LC	****
ARENA - CBS LO	****
ARENA - CBS R	****
ARENA - CBS R MO	****
ARENA - CBS R VEG	****
CBS LC - CBS LO	0.30324566
CBS LC - CBS R	****
CBS LC - CBS R MO	****
CBS LC - CBS R VEG	****
CBS LO - CBS R	****
CBS LO - CBS R MO	****
CBS LO - CBS R VEG	****
CBS R - CBS R MO	****
CBS R - CBS R VEG	****
CBS R MO - CBS R VEG	0.07454456

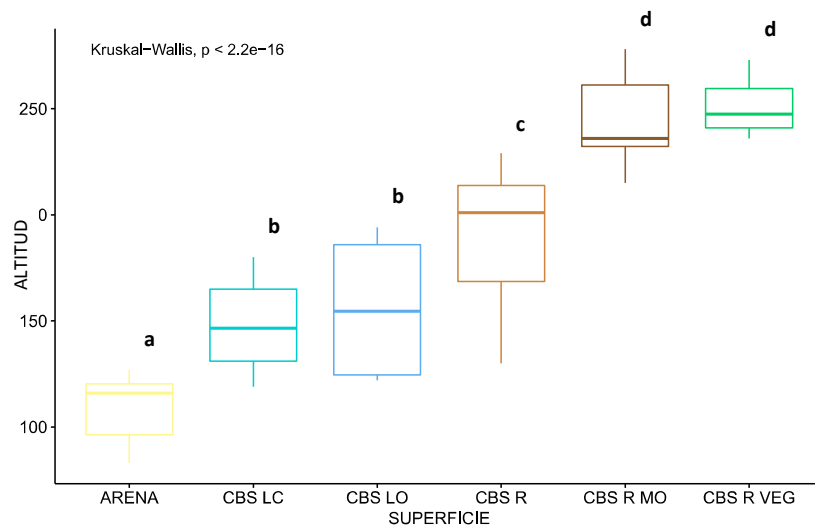


Figura 10. Relación de las tendencias central y de dispersión a la altitud donde se desarrolla cada tipo de costra biológica del suelo.

En la **Tabla 4** y **Figura 11** se observa el rango de cantidad de resistencia mecánica a la penetración del cuál es capaz de resistir cada uno de los tipos de costra biológica del suelo se desarrolla en la RN de Lachay. La única prueba realizada en el cual el valor de su p-values fue mayor a 0.05 es entre la CBS LO y CBS R, siendo la diferencia no significativa.

Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis y medida de tendencia central y de dispersión de la resistencia mecánica a la penetración (kg/cm²) de cada tipo de costra biológica del suelo.

Prueba U Mann-Whitney (Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) para dos muestras independientes.

Kruskal-Wallis :

Ji-cuadrado	Prob > Ji-Cuadrado
128.7824	<.0001

Mediana (Rango Intercuartil)

Penetración			
ARENA	0	(0 - 0.0475)	
CBS LC	0.295	(0.245 - 0.495)	
CBS R VEG	0.835	(0.74 - 0.9825)	
CBS R MO	1.45	(1.3125 - 1.615)	
CBS LO	1.955	(1.71 - 2.895)	
CBS R	2.355	(1.785 - 2.965)	

U Mann-Whitney :

SUPERFICIES			<i>p - value</i>
ARENA	-	CBS LC	****
ARENA	-	CBS LO	****
ARENA	-	CBS R	****
ARENA	-	CBS R MO	****
ARENA	-	CBS R VEG	****
CBS LC	-	CBS LO	****
CBS LC	-	CBS R	****
CBS LC	-	CBS R MO	****
CBS LC	-	CBS R VEG	****
CBS LO	-	CBS R	0.5029712
CBS LO	-	CBS R MO	***
CBS LO	-	CBS R VEG	****
CBS R	-	CBS R MO	****
CBS R	-	CBS R VEG	****
CBS R MO	-	CBS R VEG	****

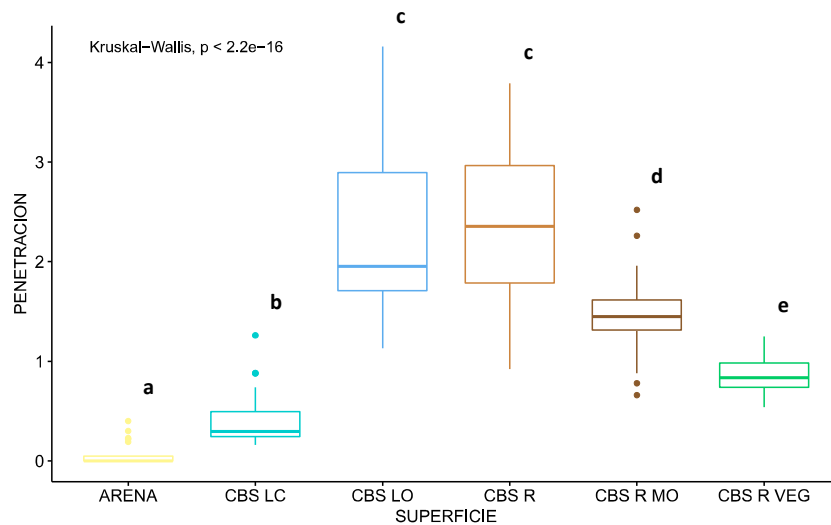


Figura 11. Relación de las tendencias central y de dispersión de la resistencia mecánica a la penetración de cada tipo de costra biológica del suelo.

6.1.3. Aplicación del escalamiento multidimensional no métrico

Se produjo un plano de dos dimensiones con valores de 0.068 para el estrés, 0.986 para el ajuste lineal y 0.995 para el ajuste lineal no-métrico tal como se observa en el diagrama de Shepard (**Figura 12**).

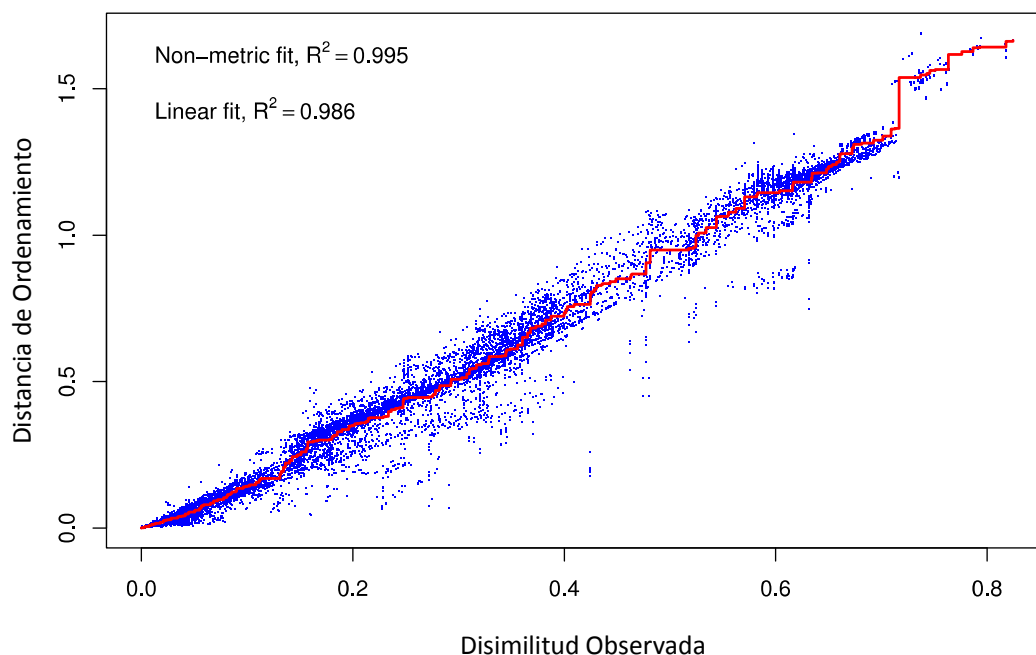


Figura 12. Diagrama de Shepard, en donde se aprecia la relación entre la distancia de Ordenamiento y la disimilitud de los datos. Una menor dispersión presente en el diagrama demuestra un buen ajuste. Ajuste lineal: 0.986, ajuste no-lineal: 0.986.

En la siguiente **Figura 13.a**, se observa la configuración del Ordenamiento en dos dimensiones, en donde se muestran las parcelas clasificadas por tipo de CBS, que en conjunto de sus características, se agruparon y aproximaron de acuerdo a similitud. Se observa una clara diferencia en la manera en como las parcelas en base a sus características terminan siendo agrupadas. A continuación, se aprecia en las **Figura 13.b** y **Figura 13.c** como las isolíneas por las variables de atura y resistencia mecánica a la penetración son determinantes y producen los límites y las distancias entre las parcelas evaluadas.

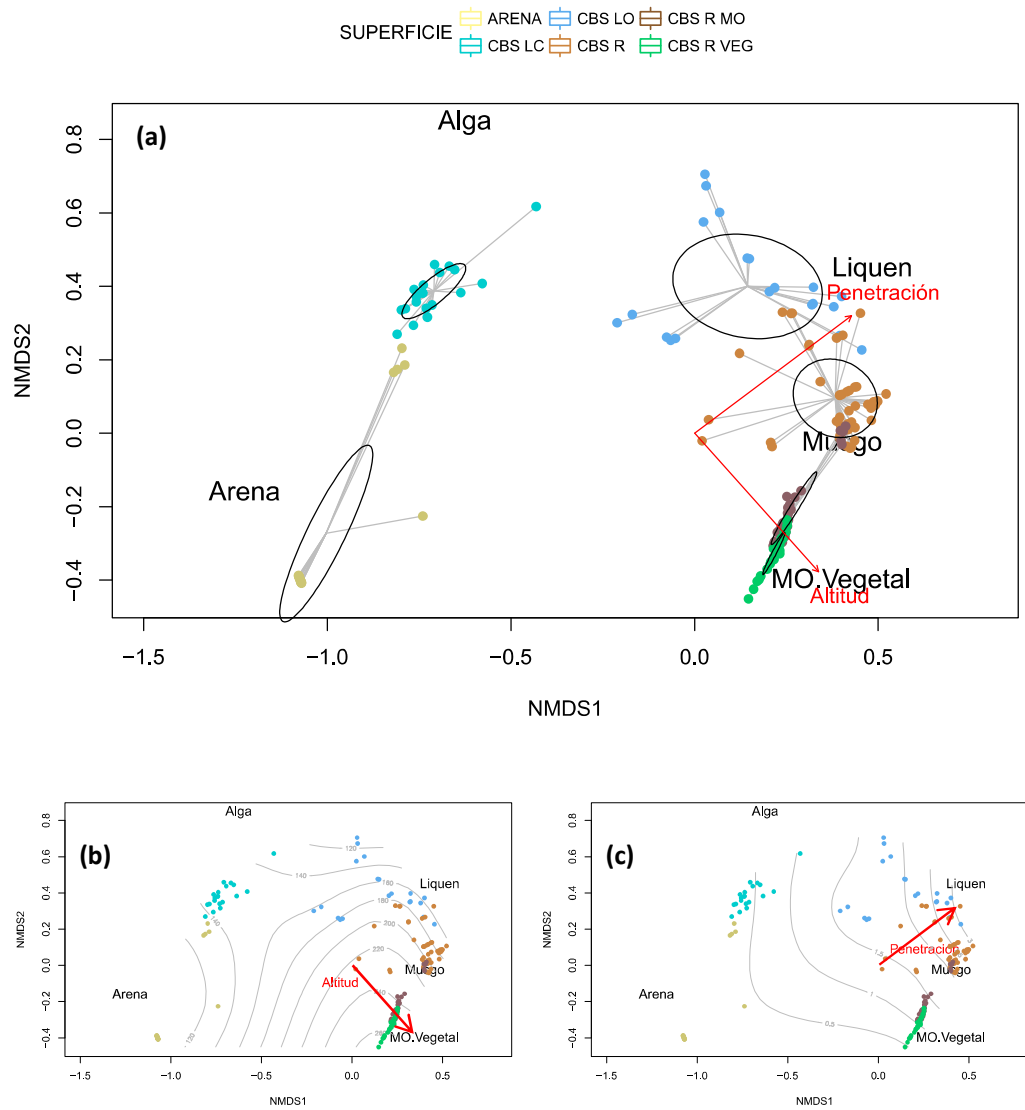


Figura 13. (a) Representación del escalamiento multidimensional no-métrico de los tipos de CBS presentes en la R.N. de Lachay. **Figura 13. (b)** y **Figura 13. (c)** se muestran las isolíneas producidas por las variables altitud y resistencia mecánica a la penetración respectivamente.

6.2. Firmas Espectrales de la CBS

De manera preliminar con los valores de reflectancia de superficie de las bandas 2 – 7 extraídos de los pixeles que corresponden cada parcela evaluada, se realizó una exploración de los datos como diagramas de dispersión con el fin de visualizar alguna tendencia en la correlación entre bandas. En la **Figura 14**, se observa que aquellas relaciones de banda con menor R^2 son: entre la banda 2 y la banda 6, y entre la banda 3 y la banda 6. En la **Figura 15**, se observan los mismos diagramas de dispersión, pero los valores representados fueron agrupados por su categoría respectiva para una mejor visualización de su dispersión.

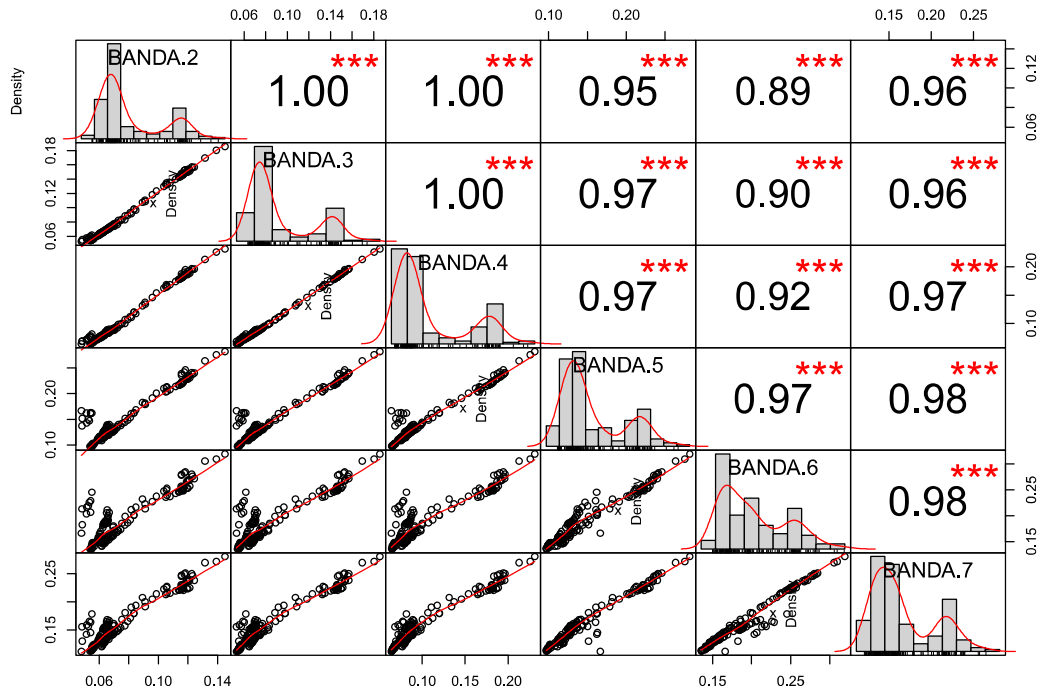


Figura 14. Diagrama de dispersión entre las combinaciones posibles de las bandas con sus respectivos valores R^2 .

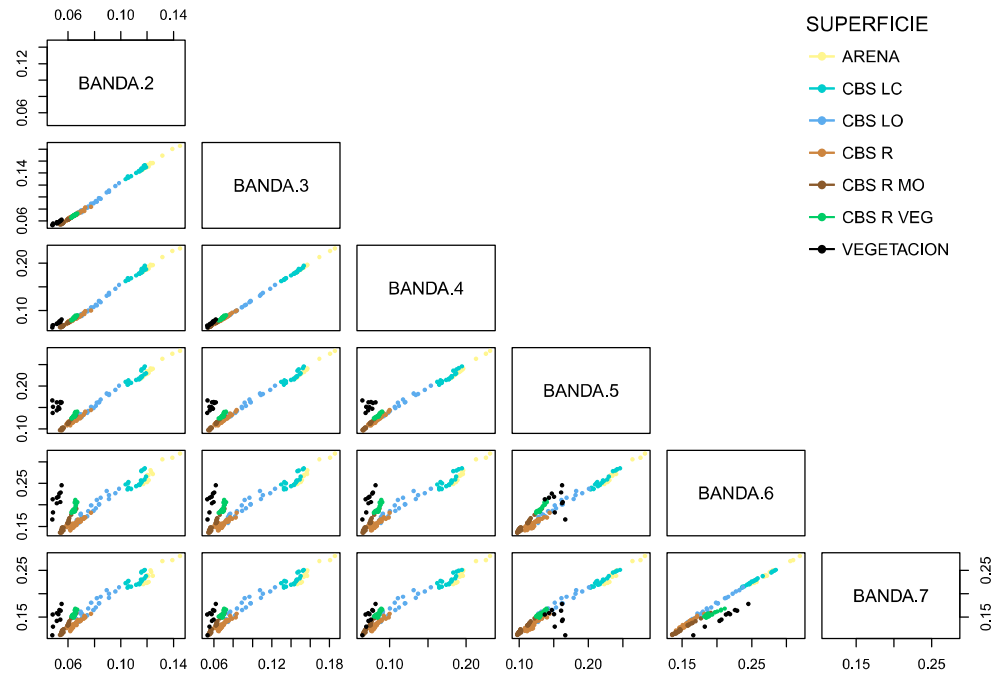


Figura 15. Diagrama de dispersión entre las combinaciones posibles de las bandas, la información introducida esta agrupada en base a su categoría.

La **Figura 16**, representa un diagrama de dispersión de tres ejes (x, y, z), en donde se tomaron las bandas con el menor R^2 en conjunto: banda 2, banda 3 y banda 6, con el fin de visualizar y explorar el comportamiento de los valores de reflectancia de cada superficie en estos espectros de manera empírica.

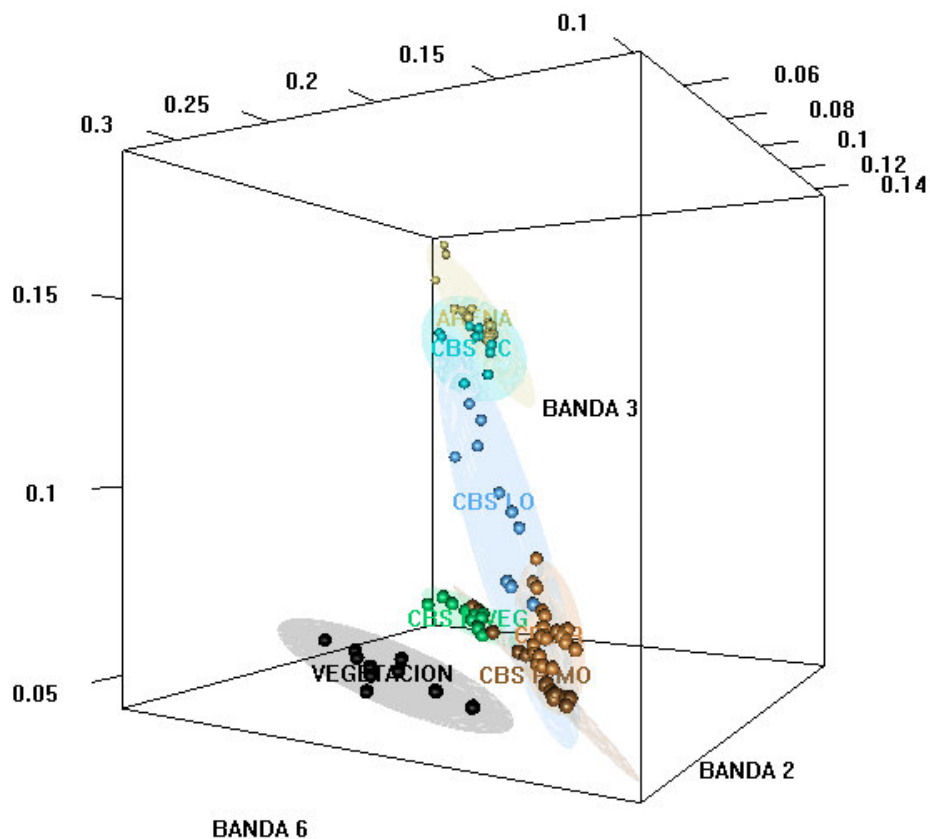


Figura 16. Diagrama de dispersión de 3 tres ejes, banda 2, banda 3, y banda 6.

Acto seguido se realizaron pruebas de normalidad Shapiro-Wilk. Visto que buen número de estas no presentaron distribución Normal, se utilizó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis y posteriormente la prueba U Mann-Whitney para dos muestras con el fin de demostrar que existe diferencia entre grupos de rangos (Nivel de Reflectancia por Banda vs. tipos de costra) y que esta diferencia sea estadísticamente significativa y no se deba al azar (Mann & Whitney, 1947) (**Anexo VII y VIII**).

A continuación, en las tablas de la **Figura 17** se pueden apreciar la tendencia central a la intensidad de energía reflejada de cada tipo de CBS por banda, así como la medida de dispersión a través del rango intercuartil. Los valores de p-value también se pueden hallar, encontrándose en algunos en donde la diferencia no es significativa.

Para la Banda 2, la única prueba cuyo valor p-value es mayor a 0.05, es entre la CBS RMO y la costra RVEG (**Figura 17.a**).

Para la Banda 3, las pruebas con valores p-value mayor a 0.05, son entre la CBS RMO y la VEGETACIÓN, y entre la CBS R y CBS R VEG (**Figura 17.b**).

Para la Banda 4, la única prueba cuyo valor p-value es mayor a 0.05, es entre la CBS RMO y la VEGETACIÓN (**Figura 17.c**).

Para la Banda 5, la única prueba cuyo valor p-value es mayor a 0.05, es entre la CBS LO y la VEGETACIÓN (**Figura 17.d**).

Para la Banda 6, las pruebas con valores p-value mayor a 0.05, son entre la CBS RVEG y la CBS LO, entre la CBS LO y VEGETACIÓN y entre CBS LC y ARENA (**Figura 17.e**).

Para la Banda 7, las pruebas con valores p-value mayor a 0.05, son entre la CBS RVEG y la VEGETACIÓN y entre CBS LC y ARENA (**Figura 17.f**).

En la **Figura 18.a** y **Figura 18.b**, se aprecia en síntesis cada una de las firmas espectrales de los tipos de CBS de la RN de Lachay de acuerdo a las bandas y a la posición en el espectro electromagnético.

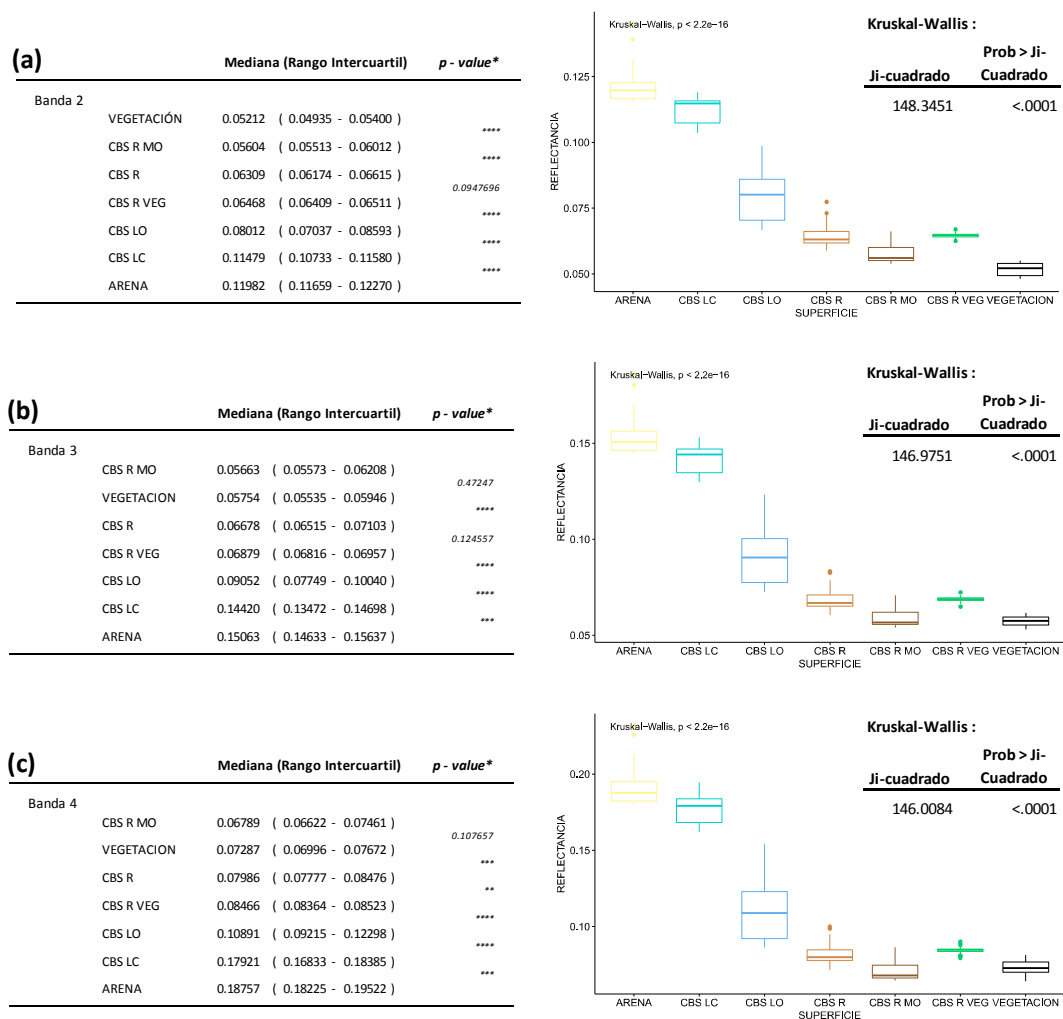
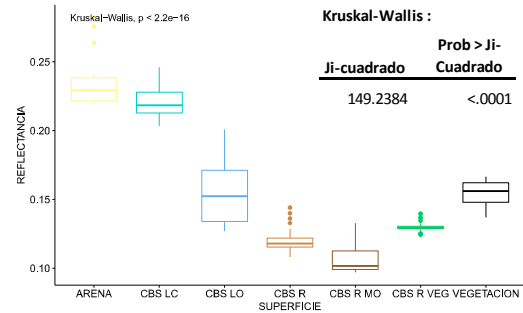
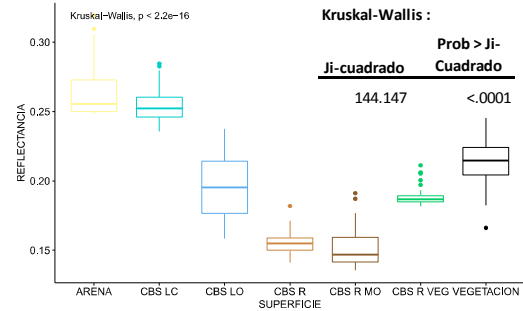


Figura 17. Prueba de Kruskal-Wallis y medida de la tendencia central y medida de la dispersión de la energía reflejada de la superficie de la CBS por banda. Tabla y gráfico respectivos: **(a)** Banda 2, **(b)** Banda 3 y **(c)** Banda 4.

(d)		Mediana (Rango Inter cuartil)	p - value*
Banda 5			
	CBS R MO	0.10170 (0.09900 - 0.11268)	****
	CBS R	0.11801 (0.11544 - 0.12191)	****
	CBS R VEG	0.12946 (0.12878 - 0.13049)	***
	CBS LO	0.15243 (0.13402 - 0.17111)	0.812072
	VEGETACION	0.15610 (0.14786 - 0.16211)	****
	CBS LC	0.21841 (0.21279 - 0.22795)	**
	ARENA	0.22934 (0.22175 - 0.23848)	



(e)		Mediana (Rango Inter cuartil)	p - value*
Banda 6			
	CBS R MO	0.14695 (0.14159 - 0.15934)	.
	CBS R	0.15490 (0.15016 - 0.15900)	****
	CBS R VEG	0.18679 (0.18490 - 0.18928)	0.520461
	CBS LO	0.19532 (0.17655 - 0.21415)	0.119629
	VEGETACION	0.21481 (0.20429 - 0.22424)	****
	CBS LC	0.25220 (0.24608 - 0.26043)	0.0964996
	ARENA	0.25547 (0.25001 - 0.27283)	



(f)		Mediana (Rango Inter cuartil)	p - value*
Banda 7			
	CBS R MO	0.12125 (0.11730 - 0.13329)	***
	CBS R	0.13249 (0.12852 - 0.13770)	****
	CBS R VEG	0.15425 (0.15213 - 0.15670)	0.958458
	VEGETACION	0.15591 (0.14279 - 0.16250)	**
	CBS LO	0.17531 (0.15781 - 0.19200)	****
	ARENA	0.22504 (0.22349 - 0.24155)	0.276627
	CBS LC	0.22677 (0.22106 - 0.23432)	

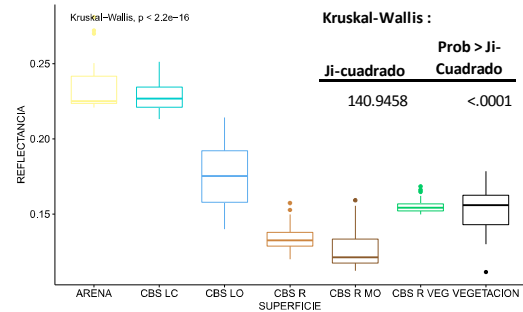


Figura 17. Prueba de Kruskal-Wallis y medida de la tendencia central y medida de la dispersión de la energía reflejada de la superficie de la CBS por banda. Tabla y gráfico respectivos: **(d)** Banda 2, **(e)** Banda 3 y **(f)** Banda 4.

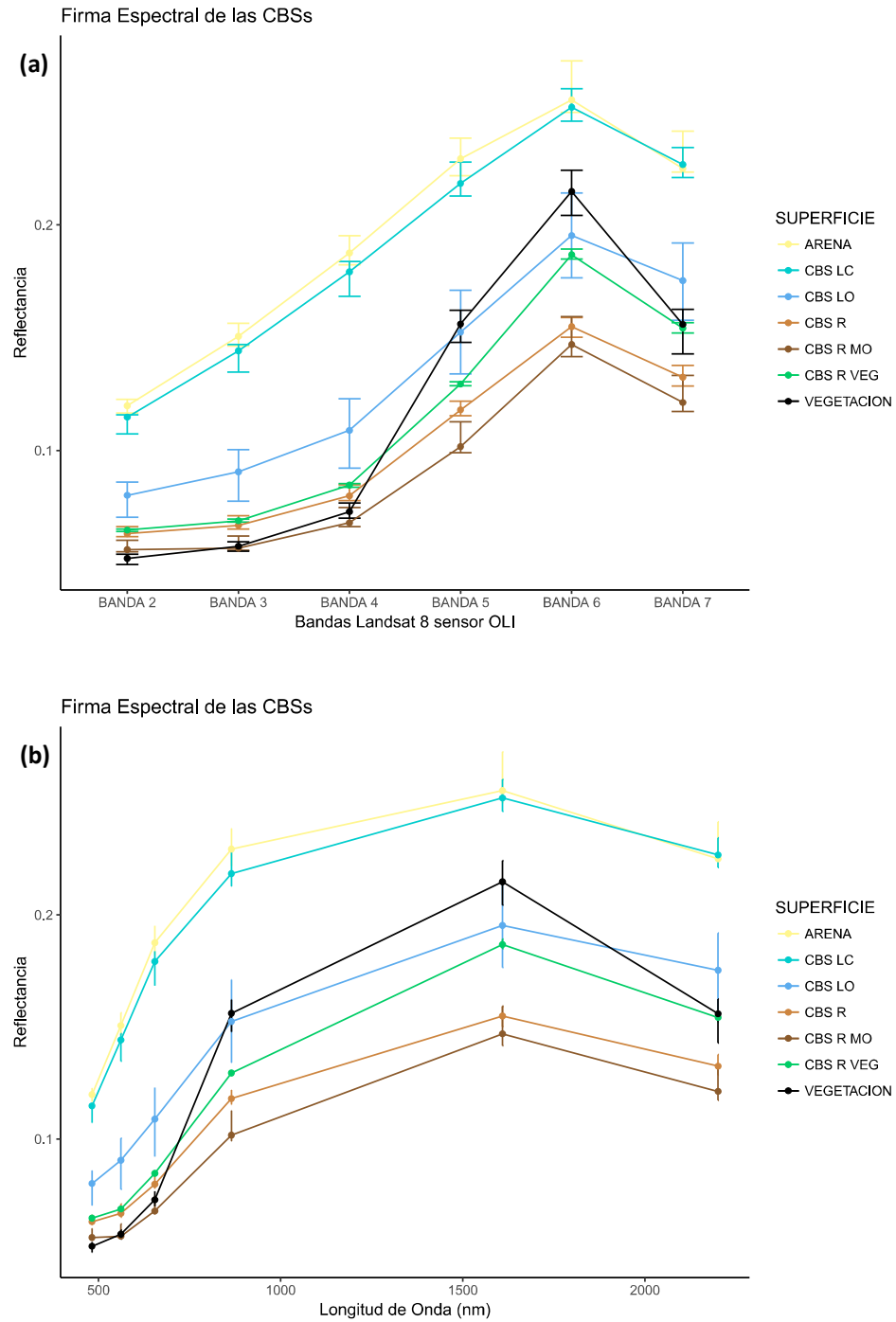


Figura 18. Firmas espectrales de las CBS encontrados en la R.N. de Lachay.

(a) En base a las bandas del Sensor OLI del Landsat 8. (b) Ubicación en el espectro electromagnético.

6.3. Clasificación de la CBS

En la **Figura 19** se nos muestra la precisión de cada uno de los diferentes modelos producidos por el algoritmo *Random Forest* utilizando la validación cruzada (cross-validation) con 10 iteraciones y 10 repeticiones, en base al número de variables utilizados aleatoriamente (m). Siendo aquel modelo en donde toma solo tres variables (bandas) de manera aleatoria el modelo con mayor precisión en predicción.

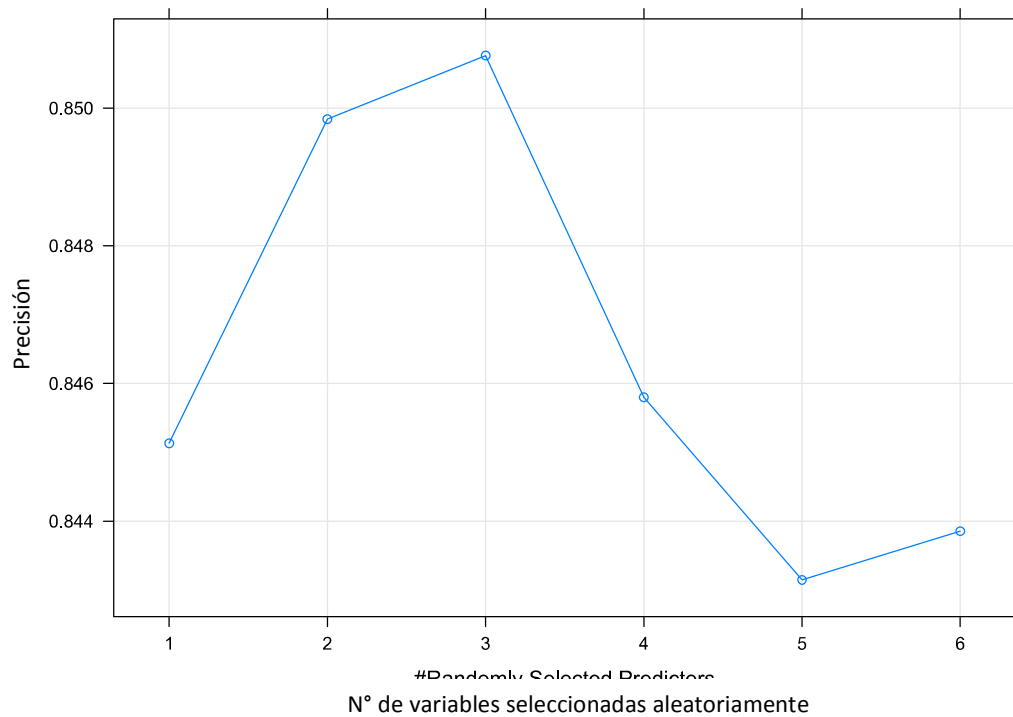


Figura 19. Evaluación de la precisión de los diferentes modelos clasificadores

Random Forest en base al número de variables que toma aleatoriamente para tomar una decisión.

Una vez elegido el algoritmo con el mayor valor de precisión, se realizó un análisis de importancia que tienen las bandas en la toma de decisiones. En la **Figura 20.a** se observa la influencia de cada banda sobre la precisión de la predicción al ser excluidas.

De manera similar, en la **Figura 20.b** se observa la influencia negativa sobre la pureza en las decisiones tomadas en cada nodo (decisión) en los árboles por la ausencia de cada banda (Índice de Gini).

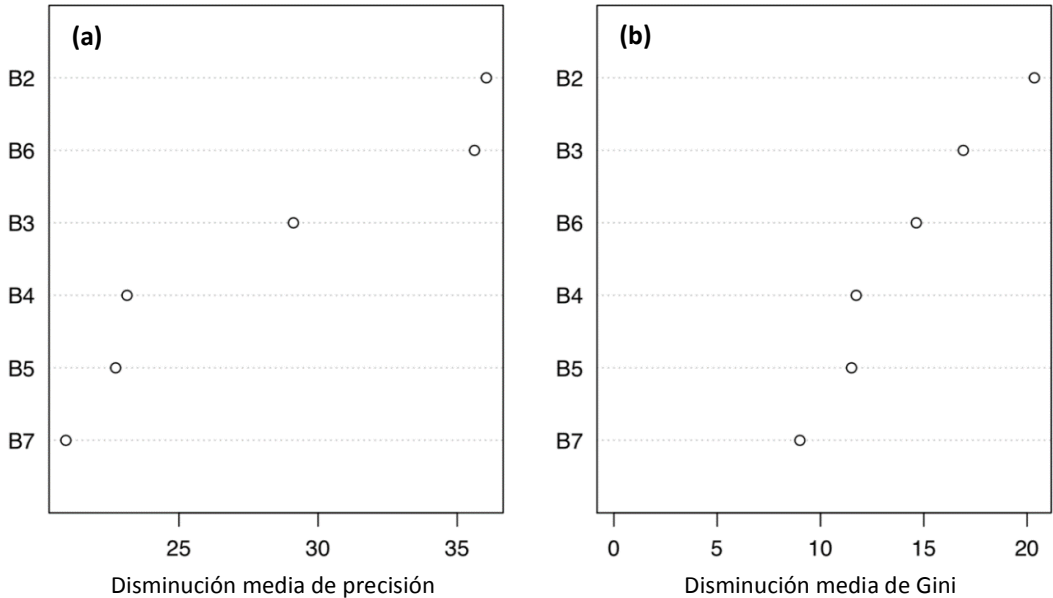


Figura 20. Visualización de la importancia de las bandas para la clasificación de los tipos de CBS en la R.N. de Lachay a partir de imágenes satelitales. **(a)** Influencia negativa por ausencia de bandas en la disminución de la precisión de la predicción. **(b)** Influencia negativa por ausencia de las bandas en la disminución del índice Gini (pureza) en los nodos.

En la siguiente **Tabla 5**, se aprecia de manera más detallada la importancia de las bandas para cada uno de los tipos de CBS para su clasificación. En síntesis, tanto la Banda 2 como la Banda 6 tienen una considerable repercusión para la clasificación de las CBS.

Tabla 5. Importancia de las bandas por clase de CBS en base a la disminución media de precisión. En color oscuro se muestran la de mayor importancia.

	ARENA	CBS LC	CBS LO	CBS R	CBS RMO	CBS RVEG	VEGETACIÓN
Banda 2	29.84	5.562	17.06	15.15	12.27	20.823	21.162
Banda 6	12.11	11.053	14.119	36.25	17.376	18.819	12.581
Banda 3	18.66	7.358	18.994	12.38	14.629	18.177	16.186
Banda 4	16.56	6.412	13.819	11.62	13.423	9.867	10.847
Banda 5	12.72	7.516	9.868	14.93	16.262	14.795	12.736
Banda 7	10.11	13.466	10.939	16.36	8.175	10.751	1.223

6.4. Matriz de confusión y validación de la clasificación

Finalmente, se utilizó la matriz de confusión como herramienta para validar la clasificación generada. Se ingresó la información de prueba cuya clasificación era conocida y se midió la exactitud en base a la nueva categoría que se le predijo después de la clasificación (**Tabla 6**). Dando como resultado una precisión global de 87.32% con un índice kappa de 0.84.

Clase	ARENA	CBS LC	CBS LO	CBS R	CBS R MO	CBS R VEG	VEGETACION	TOTAL	P Usuario %	E Comision %
ARENA	0	3	0	0	0	0	0	3	0.00	100.00
CBS LC	0	7	0	0	0	0	0	7	100.00	0.00
CBS LO	0	0	8	1	0	0	0	9	88.89	11.11
CBS R	0	0	2	22	3	0	0	27	81.48	18.52
CBS R MO	0	0	0	0	12	0	0	12	100.00	0.00
CBS R VEG	0	0	0	0	0	13	0	13	100.00	0.00
VEGETACION	0	0	0	0	0	0	0	0	100.00	0.00
TOTAL	0	10	10	23	15	13	0	71		
Proporcion de muestreo	0.00	0.14	0.14	0.32	0.21	0.18	0.00	1.00		
P Productor %	100.00	70.00	80.00	95.65	80.00	100.00	100.00			
E Omision %	0.00	30.00	30.00	4.35	20.00	0.00	0.00			
Precision										
Global %	87.32									
Kappa	0.84									

Tabla 6. Matriz de confusión evaluando la clasificación de tipos de CBS por medio del algoritmo *Random Forest*.

6.5. Generación del mapa de la R.N. de Lachay con los tipos de CBS

Como producto final de la clasificación se obtuvo un mapa con áreas clasificadas correspondientes a los tipos de CBS (CBS LC, CBS LO, CBS R, CBS RMO, CBS RVEG), así como superficies de arena y vegetación. Como primer paso, se excluyeron las áreas con intervención humana (granjas y campos de cultivo) presente tanto en la misma RN como en la ZN de amortiguamiento. Se presentan dos mapas: a) en el primero la clasificación dentro de la extensión comprendida por la RN y la zona de amortiguamiento (**Figura 22**) y b) en el segundo mapa de la extensión de sólo la RN de Lachay (**Figura 23**).

Tabla 7. Extensión de los tipos de CBS presentes en la R.N. de Lachay.

Clase	RN + ZA Area (Km ²)	RN Area (Km ²)	ZA Area (Km ²)
ARENA	8.23 (10%)	4.24 (8%)	3.99 (12%)
CBS LC	9.87 (12%)	5.07 (10%)	4.80 (14%)
CBS LO	22.21 (26%)	12.76 (25%)	9.45 (28%)
CBS R	9.36 (11%)	8.29 (16%)	1.07 (3%)
CBS RMO	10.41 (12%)	7.67 (15%)	2.74 (8%)
CBS RVEG	7.99 (10%)	4.86 (10%)	3.13 (10%)
VEG	10.00 (12%)	7.70 (15%)	2.30 (7%)
INTERVENIDA	6.17 (7%)	0.10 (<1%)	6.07 (18%)
Total	84.24	50.69	33.55

En la **Tabla 7** y **Figura 21** se presenta los tipos de CBS presentes en la RN de Lachay tanto en su extensión comprendida en conjunto con la zona de amortiguamiento, como independientemente. Pudiéndose observar que el tipo de CBS predominante abarcando hasta un 30% es la costra biológica del suelo lisa oscura. El resto de tipos de CBS presentan una superficie menor al 15% cada una.

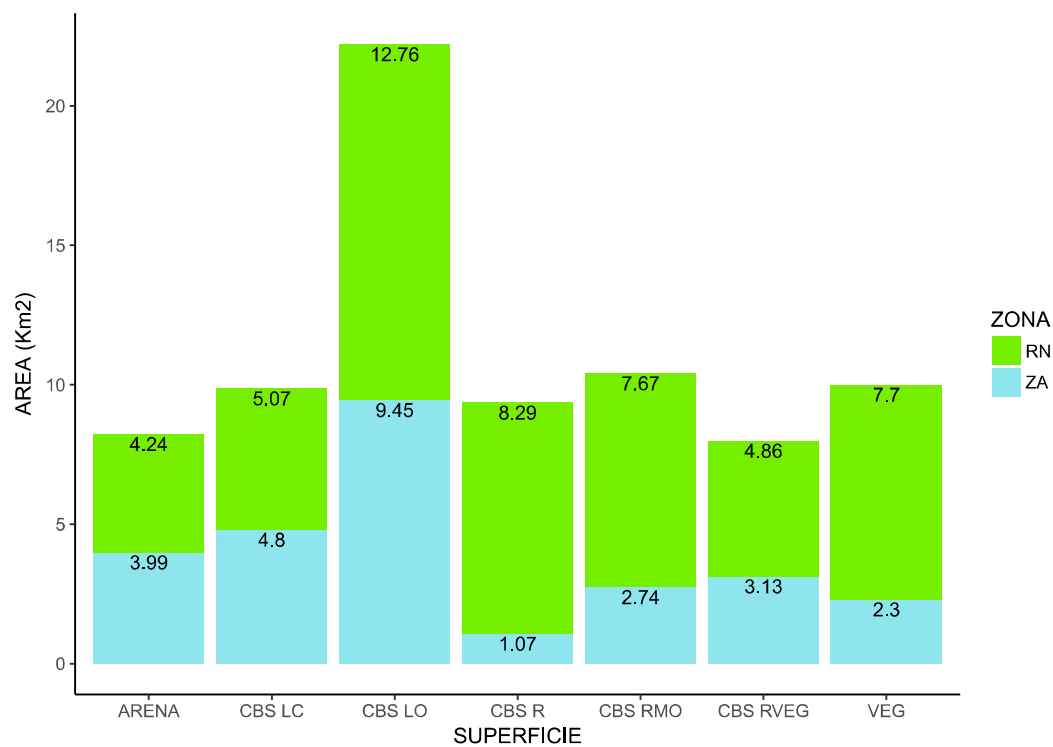


Figura 21. Representación gráfica de la extensión de los tipos de CBS presentes en la Reserva Nacional de Lachay.

RN: reserva nacional, ZA: zona de amortiguamiento.

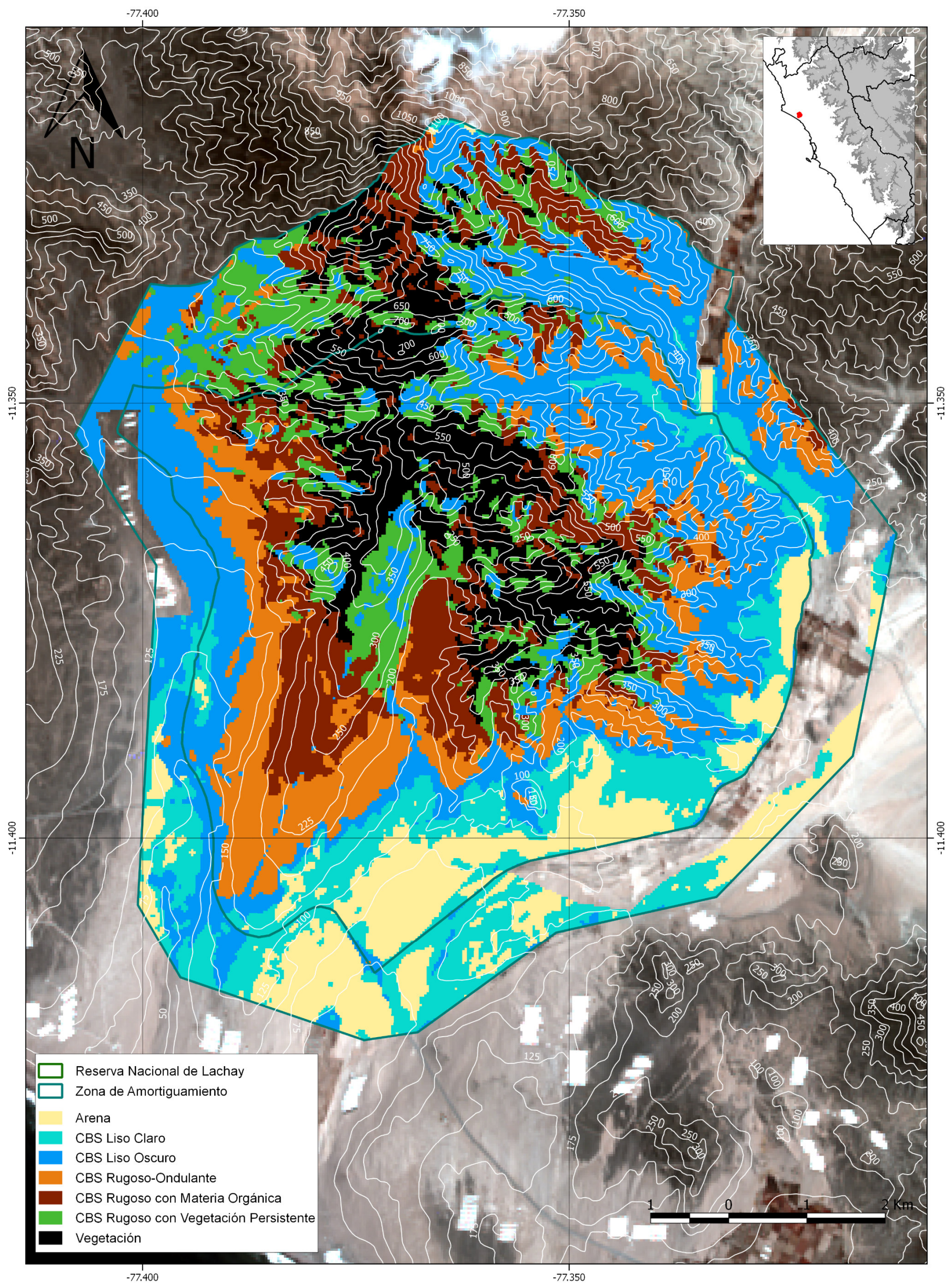


Figura 22. Mapa de los tipos de cobertura de suelo clasificada en la Reserva Nacional de Lachay y zona de amortiguamiento.

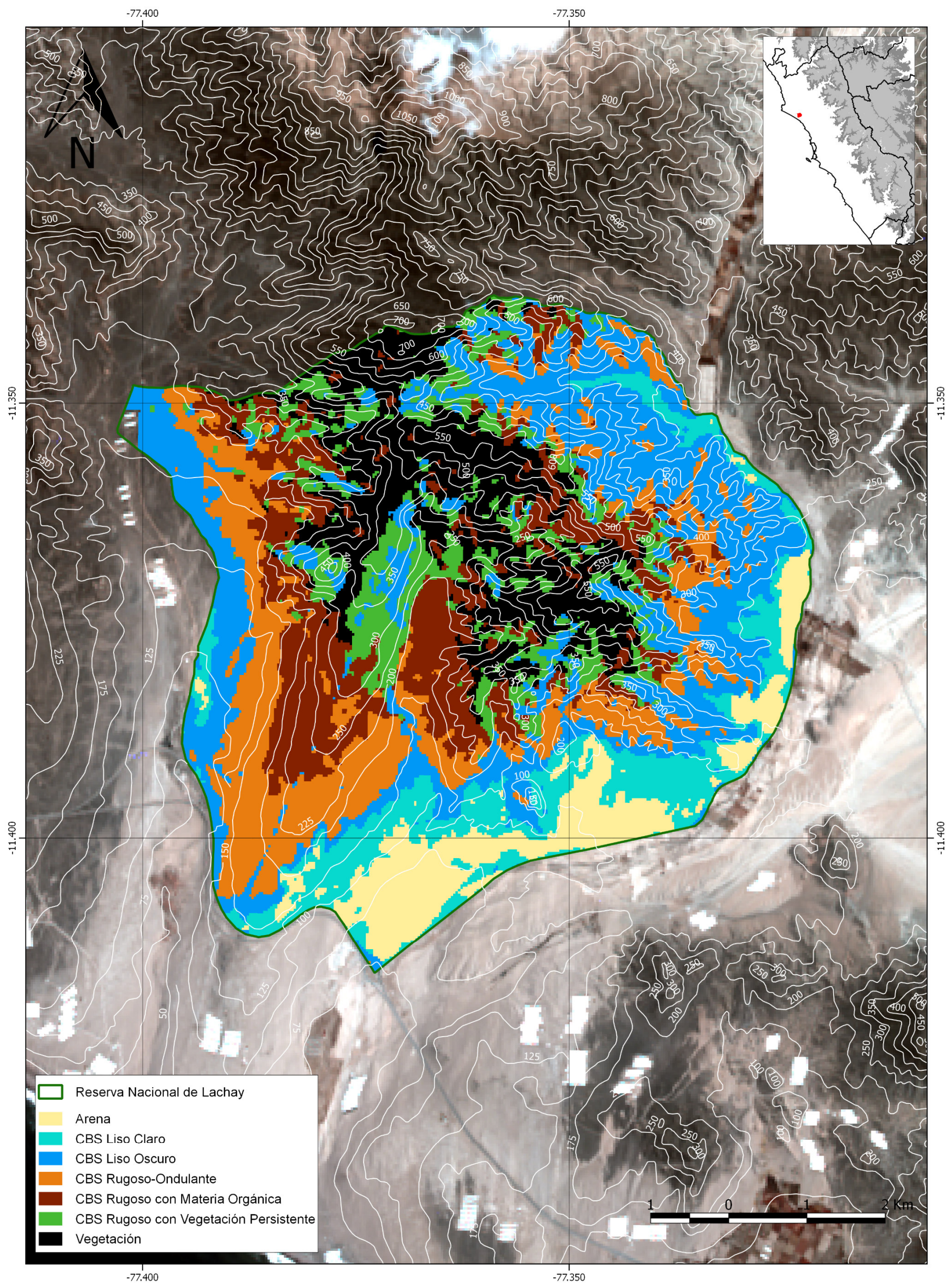


Figura 23. Mapa de los tipos de cobertura de suelos registradas en la Reserva Nacional de Lachay.

VII. DISCUSIÓN

7.1. Clasificación de los tipos de CBS en la R.N. de Lachay

La clasificación de los tipos de CBS presentes en la RN de Lachay planteada en este trabajo, se basó en clasificaciones de los tipos de CBS propuestas por diversos autores. Para esto, se analizó la composición comunitaria y aspectos topográficos como altitud a la cual se desarrollan y propiedades físicas como la resistencia mecánica a la penetración.

Respecto a la altitud, se muestra que las diferentes CBS se desarrollan a un determinado rango de altitud. Siendo notable esta diferencia en casi todas las distintas CBS. Aunque cabe precisar que entre la CBS LC y la CBS LO, como entre la CBS RMO y CBS R VEG no existe evidencia para su diferenciación debido a que no presentan un *p-value* significativo.

Por otro lado, la característica relacionada a la resistencia mecánica a la penetración que presentan las CBS, muestra una clara diferenciación significativa en la mayoría de las diferentes CBS, exceptuando entre la CBS LO y CBS R. Las CBS tienen mayor resistencia a la penetración que la ARENA, siendo la CBS LC la de menor valor entre ellas. La resistencia va desde la CBS LC en aumento a través de la CBS LO hasta la CBS R, que es a partir de la CBS RMO donde comienza a disminuir hasta la CBS RVEG.

Al llevar a cabo el análisis de ordenamiento mediante el escalamiento multidimensional no-métrico con las tres variables en conjunto, arrojó un valor de estrés de 0.068, valor que indica que el ordenamiento presenta una bondad de ajuste buena para justificar la separabilidad de los tipos de costra en base a sus disimilitudes y sus distancias (**Tabla 8**). Este valor pone en evidencia que las parcelas etiquetadas en base a la clasificación propuesta por su descripción y en conjunto con la información tomada en campo, presentan alta similitud y afinidad de agrupación para determinar de manera efectiva

que existen diferentes tipos de costra con características propias tal como se observa en la **Figura 13.a**. Por otro lado, en la misma figura podemos ver la distancia y disimilitud de un tipo de costra con otra, además de apreciar la gradiente y/o transición entre ellas de acuerdo a la proximidad en el que se encuentren. Con lo expuesto anteriormente, se observa que la CBS RMO y CBS RVEG presentan una mayor similitud y hasta solapamiento, que en cierta manera podría explicarse de dos maneras: que las parcelas colindantes pertenecientes a estos dos tipos de costra estén de alguna manera localizadas en el ecotono o que no haya mucha evidencia para justificar que estos dos tipos de costras biológicas se consideren distintos. Cabe la posibilidad de reducir el número de clases y juntar la CBS RMO y CBS RVEG, ya que el valor de estrés para esta prueba es directamente proporcional al número de clases a evaluar (Kruskal, 1964; Clarke, 1993). Ahora bien, no habría necesidad de recurrir a la segunda opción porque la prueba de ordenamiento con los cinco tipos de CBS propuestos en este trabajo tal como se había demostrado tiene una bondad de ajuste buena, además de presentar valores de 0.986 para el ajuste lineal y 0.995 para el ajuste lineal no-métrico, demostrando una buena correlación entre la disimilitud observada y la distancia del ordenamiento generado.

Tabla 8. Intervalos de estrés y su interpretabilidad para justificar la disimilitud y distancia de muestras evaluadas (Kruskal, 1964; Clarke, 1993).

Estrés	Bondad de Ajuste
<0.025	Perfecta
0.025-0.05	Excelente
0.05-0.1	Buena
0.1-0.2	Justa
0.2-0.35	Pobre
>0.35	Aleatoria

7.2. Características espectrales y la firma espectral de las CBS en la R.N. de Lachay

La exploración de los valores de reflectancia de los tipos de CBS por bandas pareadas en el diagrama de dispersión (**Figura 15**) nos muestra que en su mayoría los valores de correlación son altos. Aunque cabe resaltar que aquellas relaciones que muestran los valores más bajos: B2-B6 y B3-B6, en donde se observa mayor dispersión de datos, pero a la vez afinidad de agrupamiento por tipos de superficie (**Figura 24**). No obstante, sucede lo contrario con respecto a la correlación entre las bandas B2-B3. Superficies como VEGETACIÓN y ARENA se observan muy bien distanciados del conjunto de superficies conformado por las costras biológicas. Además, cabe resaltar que se logra observar cierta separabilidad en los valores de reflectancia también entre los distintos tipos de CBS.

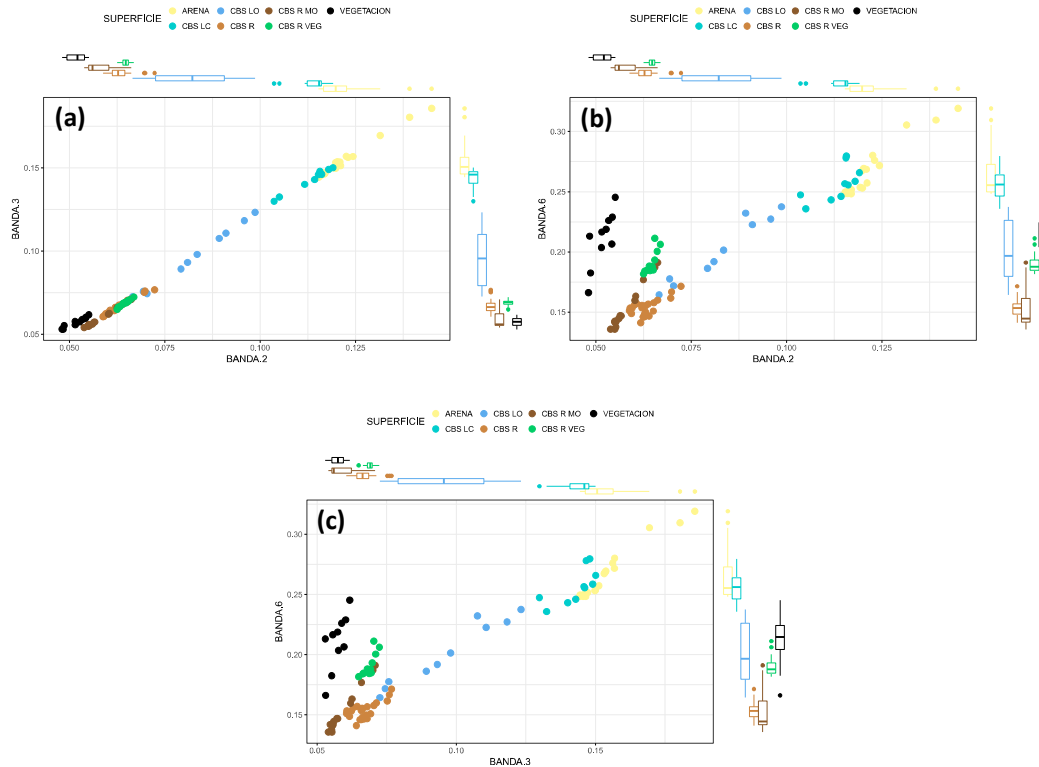


Figura 24. Diagramas de dispersión de las Bandas 2, 3 y 6. **(a)** Banda 2 y Banda 3 con $R^2=1.00$; **(b)** Banda 2 y Banda 6 con $R^2=0.89$; **(c)** Banda 3 y Banda 6 con $R^2=0.90$.

Esta observación empírica nos da indicio de cuan notable resulta la separabilidad a partir de la elección de ciertas bandas. En la **Figura 16**, al tomar la Banda 2, 3 y 6 en un diagrama en tres ejes se aprecia notablemente como las distintas superficies llegan a estar agrupadas en común y separadas de los diferentes tipos.

Así mismo, al evaluar de manera individual el comportamiento de la reflectancia de los tipos de superficie por cada una de las bandas, resultan muy particulares entre ellas mismas. Tanto la banda B2, B4 y B5 nos indican una buena separabilidad entre diferentes superficies salvo por un par de superficies en donde no existe diferencia significativa: CBS R – CBS RVEG; CBS RMO – VEGETACIÓN y CBS LO – VEGETACIÓN respectivamente. Mientras bandas como B3 y B7 muestran una separabilidad regular entre las diferentes superficies dado que presentan dos pares de

superficie que no tienen diferencia significativa: CBS R – CBS RVEG y CBS RMO – VEGETACIÓN para la banda 3; y ARENA – CBS LC y CBS RVEG – VEGETACIÓN para la banda 2. Por último, la banda B6 presenta un bajo nivel de separabilidad entre superficies debido a que cinco de estas no presentan diferenciación significativa: ARENA – CBS LC y CBS LO – CBS RVEG – VEGETACIÓN.

Ahora bien, a partir de ensamblar las firmas espectrales tomando en conjunto los valores de reflectancia en todas las bandas (**Figura 18.b**) se observa lo siguiente:

- Las firmas espectrales de todas las CBS presentan menor reflectancia que la ARENA, coincidiendo con las observaciones del trabajo realizado en Israel y Egipto por Karnieli *et al.* (1999).
- La firma espectral correspondiente a la ARENA es de la que mayor intensidad reflejante posee, siendo la de la CBS LC la que inmediatamente le sigue.
- La firma espectral de la CBS LO presenta un mismo patrón reflectante a las anteriores, pero en menor intensidad de reflectancia.
- Las firmas espectrales de la CBS R, CBS RMO y CBS RVEG resultan ser muy similares en su comportamiento. aunque difieren de cierta manera en la intensidad de energía reflejada.
- En el espectro visible (B2, B3 y B4) las firmas espectrales de las CBS se encuentran por debajo de la ARENA y reflejan una mayor cantidad por encima de la VEGETACIÓN, tal como lo observado por Karnieli y Tsoar en Israel y Egipto (1995).
- En el espectro infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (B5, B6 y B7) las firmas espectrales de las CBS presentan diferentes niveles de reflectancia, lo que estaría relacionado al nivel de desarrollo de la CBS y con una relación inversa (más desarrollo menor reflectancia), tal como lo observado por Karnieli *et al.* (1999).

- La firma espectral de la CBS RVEG es la que más se asemeja al de la VEGETACIÓN, esto puede ocurrir porque presentan mayor superficie dominada por vegetación persistente.

7.3. Validación de la clasificación de CBS en la R.N. de Lachay a partir de imágenes satelitales

Por lo que se refiere a la validación cruzada de los modelos generados por el algoritmo *Random Forest* en cuanto a la decisión del número de variables (m) que se deba tomar para obtener un modelo con el mejor poder predictivo, resultó ser $m = 3$ (**Figura 19** y **Tabla 9**), ya que tiene una precisión de 85.07% y un índice Kappa de 0.82. Ahora bien, este modelo producido es mucho más eficaz que el método de sólo seleccionar *una sola variable de manera aleatoria* ($m = 1$) y que el método *Bagging de Breiman* ($m = 6$). Vale destacar que el número de variables sugerido por Breiman para *Random Forest* es cercano al obtenido: $m = \sqrt{p} \approx 2.4$, donde: p es el número total de variables (James *et al.*, 2013; Breiman, 1996, 2001).

Tabla 9. Precisión e índice Kappa de los modelos clasificadores producidos por el algoritmo *Random Forest* en base al número de variables por validación cruzada.

n° variables aleatorios	Exactitud	Kappa
1	0.8451313	0.8129113
2	0.8498384	0.8190334
3	0.8507626	0.8201825
4	0.845798	0.8143059
5	0.8431465	0.8113345
6	0.8438535	0.8121572

En cuanto al análisis de las variables y su importancia para la clasificación (**Figura 20**), se observó que la Banda 2, la Banda 6 y la Banda 3 son cruciales para obtener una buena precisión en la clasificación. La ausencia de tanto la Banda 2 o la Banda 6 reduciría en general la precisión en un 35%, y la ausencia de la Banda 3 en un 30%.

En la **Figura 25** se observa el grado que influye la ausencia de determinadas bandas y como está relacionada con la clasificación para cada una de las tipos de superficie. La clasificación de ARENA, CBS LO, CBS RVEG, VEGETACIÓN se ve fuertemente influenciada por la Banda 2 y Banda 3. En cambio, la Banda 6 influye de manera drástica en la clasificación de CBS LC, CBS R, CBS RMO y CBS RVEG. Prueba de esto se puede encontrar respaldado por la bibliografía. En efecto, Karnieli y Sarafis (1996) encontraron que la razón por la cual la región azul del espectro (Banda 2) es un buen indicador para detectar CBS se debe a que el factor determinante para la absorción de la luz azul es la presencia de los pigmentos de ficobilina presente en éstos. Más adelante Karnieli (1997) desarrolla el *índice espectral de costra* (CI). Cabe resaltar que en relación a la región verde del espectro (Banda 3) y a la región infrarroja, Chen *et al.* (2005) desarrollaron el *índice de la costra biológica* (BSCI).

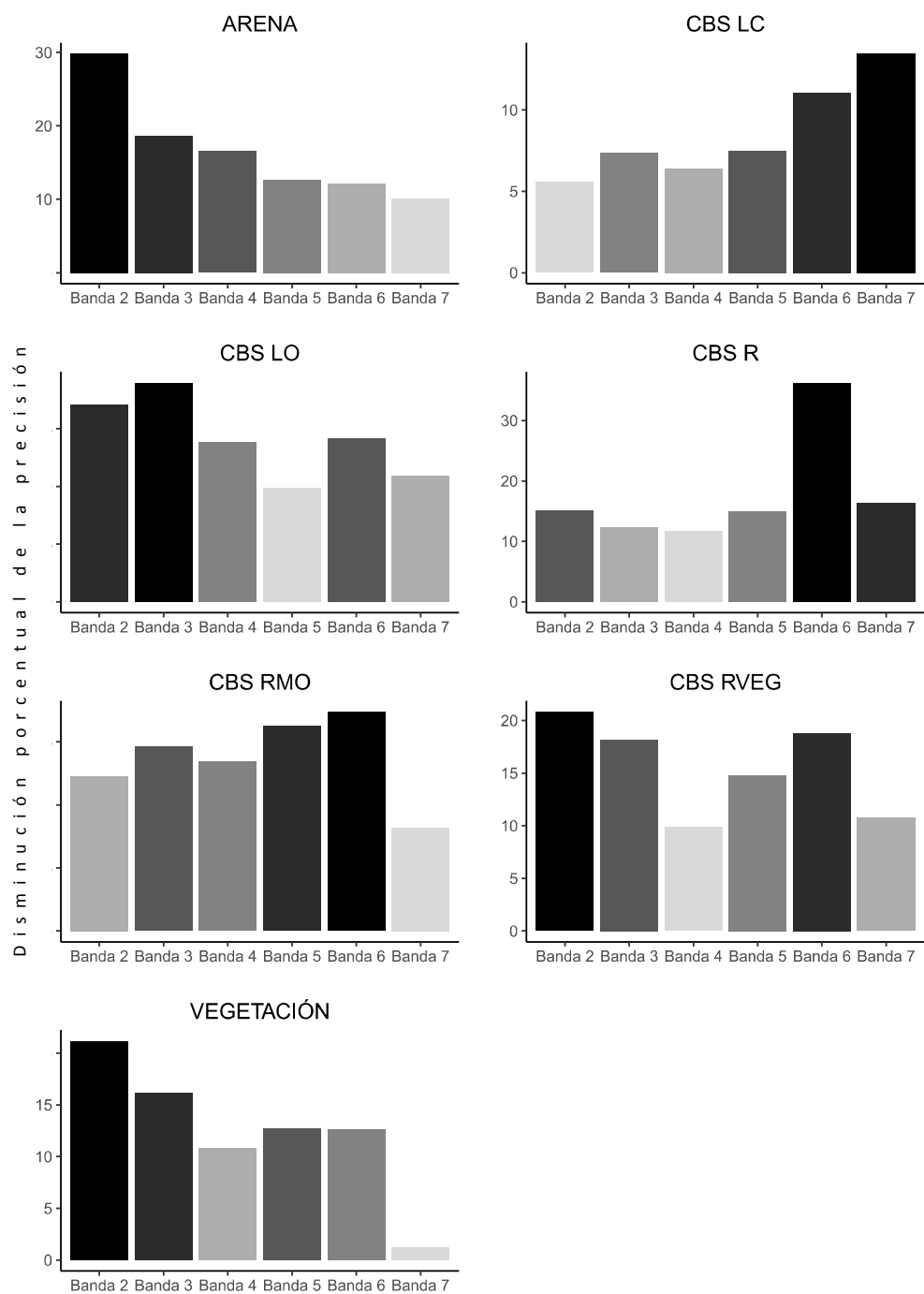


Figura 25. Importancia de variable para cada una de las siete categorías de superficie. Mostrándose en el eje y la disminución porcentual de la precisión de la clasificación en ausencia de cada banda.

Por último, respecto a la validación y precisión de la clasificación generada de las CBS en la RN de Lachay, se obtuvo un valor de 87.32% para la precisión global (**Tabla 10**). Valor que, superando el 85% sugerido por Foody (2002), se calificaría a la clasificación como aceptable.

Tabla 10. Precisión global, de productor y de usuario por cada superficie obtenido de la Clasificación de las CBS mediante *Random Forest*.

Tipos de Costra Biológica de Suelo	Precisión de Productor (%)	Precisión de Usuario (%)
CBS LC	70.00	100.00
CBS LO	80.00	88.89
CBS R	95.65	81.48
CBS RMO	80.00	100.00
CBS RVEG	100.00	100.00
Precisión Global	87.32	
Índice Kappa	0.84	

No obstante, al realizar el análisis complementario de precisión para cada uno de los distintos tipos de CBS clasificados a partir de su precisión de productor y precisión de usuario (**Tabla 10**), obtenemos que:

- La clase con el 100% de precisión de productor y usuario es la CBS RVEG, siendo sin duda alguna la clase cuya clasificación no caería en errores de clasificación ni confusión con las demás clases.
- La CBS LC es la clase con el menor valor de precisión de productor con un 70%, habiendo pixeles pertenecientes a esta clase que terminaron clasificados como ARENA (**Tabla 10**). Además, como indica su precisión de usuario, resulta que el 100% de estos pixeles clasificados si pertenecen a la clase CBS LC.

- La clase CBS RMO presenta una precisión de productor aceptable de 80%, en donde pixeles de referencia pertenecientes a esta clase terminaron clasificados como CBS R (**Tabla 10**). Además, al obtener una precisión de usuario de 100%, no hubieron pixeles de otra clase clasificados como CBS RMO.
- La clase CBS LO obtuvo una precisión de productor de 80%, habiendo pixeles pertenecientes a esta clase que fueron clasificados a CBS R (**Tabla 10**). No obstante, al obtener una precisión de usuario de un 88.89%, hubieron pixeles de CBS R que se clasificaron en CBS LO.
- Finalmente, la clase CBS R resultó con una precisión de productor de un 95.65%, donde pixeles pertenecientes a esta clase fueron clasificados en CBS LO (**Tabla 10**). Ahora bien, el valor de 81.48% para la precisión de usuario se debe a que hubieron pixeles pertenecientes de las clases CBS LO y CBS RMO que acabaron clasificadas como CBS R.

En síntesis, la precisión global en conjunto con las precisiones de productor y usuario de cada una de las clases nos muestra que la clasificación tiene un grado bueno de confianza. Además, tomando en cuenta el índice Kappa obtenido con un valor de 0.84, nos demuestra que existe una correlación positiva entre la clasificación producida y la realidad, siendo notable y casi perfecta (**Tabla 10**).

Tabla 11. Índice Kappa y su medida de fuerza de concordancia (Landis & Koch, 1977).

Estadística Kappa	Fuerza de Concordancia
<0.00	Pobre
0.00-0.20	Leve
0.21-0.40	Razonable
0.41-0.60	Moderada
0.61-0.80	Sólida
0.81-1.00	Casi perfecta

7.4. Mapa de distribución y extensión de la CBS en la R.N. de Lachay

Finalmente se presentan dos mapas temáticos producidos: el primero en donde se toma a la reserva nacional y su zona de amortiguamiento (RN + ZA) con una extensión total de 84.24 km² (**Figura 22**) y la segunda en donde se toma sólo a la reserva nacional (RN) con una extensión de 50.69 km² (**Figura 23**). Tal como se observa en la **Figura 21**, ambos mapas presentan una similar proporción con respecto a las áreas cubiertas por las distintas clases de superficie. Además, en la **Tabla 7** se observa que tanto en la RN + ZA y como sólo en la RN la CBS ocupan una extensión cercana al 70% con valores de: 59.84 km² y 38.65 km². Tomando la diferencia entre ambas cantidades, resulta que 21.19 km² de extensión de CBS se encuentra en la zona de amortiguamiento (ZA).

En efecto, la CBS con mayor área de extensión es la CBS LO ocupando una extensión de 22.21 km² en toda el área total de la RN + ZA (26%) y para sólo el área de RN una extensión de 12.76 km² (25%), mientras para sólo el área de ZA ocupa una extensión de 9.45 km² (28%).

Por otro lado, cada una de las demás CBS presenta una extensión menor del 15% cuando se toma el área total de la RN + ZA y sólo cuando se considera la RN. En cambio, para el área comprendida sólo por la ZA, la segunda CBS con mayor extensión resulta la CBS LC con 4.80 km² (casi un 15%).

Cabe señalar que en toda la ZA, las CBS LC y CBS LO son las que predominan, con una extensión de 4.80 km² (casi un 15%) y 9.45 km² (28%) respectivamente.

VIII. CONCLUSIONES

- Ha sido posible mediante el método de ordenamiento, clasificar y determinar cinco tipos de CBS durante la época seca en la Reserva Nacional de Lachay: costra biológica del suelo lisa clara (CBS LC), costra biológica del suelo lisa oscura (CBS LO), costra biológica del suelo rugosa-ondulante (CBS R), costra biológica del suelo rugosa con materia orgánica (CBS RMO) y costra biológica del suelo con vegetación persistente (CBS RVEG).
- El patrón observado durante el análisis de la variable física (resistencia a la penetración) podría estar influenciada por el nivel de desarrollo de la CBS. Pasar de CBS LC y LO dominadas por algas con nivel de cohesión significativo con las partículas del suelo, hasta llegar a tener el máximo en la CBS R en donde predomina el musgo agregándole aún mucha más resistencia. La resistencia disminuiría en las CBS RMO y CBS RVEG debido al incremento de la presencia de plantas, fragmentando y reduciendo la cohesión de las partículas en la CBS.
- Se obtuvo una aproximación del patrón de las firmas espectrales de las CBS en la RN de Lachay y su comportamiento en todo el espectro electromagnético.
- El uso del algoritmo *Random Forest* para clasificar y hallar la extensión de las CBS en la RN de Lachay fue lo suficientemente adecuado con una precisión global de 87.32% con un índice Kappa de 0.84, mostrando una notable y casi perfecta correlación positiva entre la clasificación producida y la realidad. Además, cada una de las clases clasificadas obtuvo en general valores mayores de 70% y 80% para la precisión de productor y de usuario respectivamente.
- La región azul (Banda 2), verde (Banda 3) e infrarroja de onda corta (Banda 6) del espectro electromagnético resultaron ser variables importantes para poder distinguir y clasificar los diferentes tipos de CBS.
- El mapa generado a partir de este modelo nos permite estimar la extensión de los distintos tipos de CBS presentes en la RN de Lachay. La CBS ocupan cerca

de 59.84 km² en toda el área comprendida por la RN + ZA (71%). Siendo la CBS LO aquella de mayor extensión de entre las demás abarcando 22.21 km² (26%) en toda el área. Considerando únicamente el área dentro de la Reserva Nacional, las CBS ocupan cerca de 38.65 km² (76%). La CBS LO, la CBS R y la CBS RMO con una extensión de 12.76 km² (25%), 8.29 km² (16%) y 7.67 km² (15%) respectivamente siendo las predominantes. En cambio, en el área comprendida por la ZA, las CBS ocupan unos 21.19 km² (63%). En esta zona las CBS que predominan son la CBS LC y la CBS LO con extensiones de 4.80 km² (14%) y 9.45 km² (28%) respectivamente.

IX. RECOMENDACIONES

- El modelo de clasificación propuesto para la generación de mapas de distribución de CBS en la Reserva Nacional de Lachay, abre una nueva posibilidad de poder llevar a cabo estudios posteriores y complementarios sobre la CBS, relacionados a la distribución de especies, nicho ecológico, interacciones con el ambiente, cambio climático, entre otros, pudiendo obtenerse registros en todo el año (dependiendo de la cobertura de nubes) en tiempo real.
- Hay que tener en cuenta la cantidad de información colectada en campo, en éste trabajo el tamaño de información colectada nos brindó una confiable clasificación de las CBS. Además, cabe la posibilidad de mejorar aún mucho más la precisión de la clasificación si se sigue colectando e ingresando más información para entrenar al algoritmo.
- Para extender este trabajo y mapear a lo largo de la costa, sería recomendable de todos modos coleccionar información de los distintos lugares ya que se podría dar el caso de haber CBS de alguna composición diferente a la encontrada en la RN de Lachay.
- Se podría implementar el mismo método implementado en este trabajo para imágenes obtenidas por drones que porten cámara multiespectral con el fin de poder obtener alta definición espacial, mejorando más aún el análisis y predicción de CBS y se evitaría el problema de la cobertura de nubes que presentan las imágenes satelitales.

X. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- APLIN, P. (2005). Remote sensing: ecology. *Progress in Physical Geography*, 29(1), 104-113.
- ARANA, C., CARLO, T. A., & SALINAS, L. (2016). Biological soil crust in Peru: first record and description. *Zonas Áridas*, 16(1), 112-119.
- BELNAP, J., PHILLIPS, S. L., WITWICKI, D. L., & MILLER, M. E. (2008). Visually assessing the level of development and soil surface stability of cyanobacterially dominated biological soil crusts. *Journal of Arid Environments*, 72(7), 1257-1264.
- BELNAP, J. (2006). The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological processes*, 20(15), 3159-3178.
- BELNAP, J. (2003). The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(4), 181-189.
- BELNAP, J. (2001). Comparative structure of physical and biological soil crusts. In *Biological soil crusts: Structure, function, and management* (pp. 177-191). Springer, Berlin, Heidelberg.
- BELNAP, J., BÜDEL, B., & LANGE, O. L. (2001). Biological soil crusts: characteristics and distribution. In *Biological soil crusts: structure, function, and management* (pp. 3-30). Springer, Berlin, Heidelberg.
- BREIMAN, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.
- BREIMAN, L. (1996). Bagging predictors. *Machine learning*, 24(2), 123-140.
- BÜDEL, B. (2001). Synopsis: comparative biogeography of soil-crust biota. In *Biological soil crusts: structure, function, and management* (pp. 141-152). Springer, Berlin, Heidelberg.
- CANO, A. C., ROQUE, J., ARAKAKI, M., ARANA, C., LA TORRE, M., LLERENA, N., & REFULIO, N. (1999). Diversidad florística de las lomas de Lachay (Lima) durante el evento "El Niño 1997-98". *Revista Peruana de Biología*, 6(3), 125-132.

- CANTERS, F. (1997). Evaluating the Uncertainty of Area Estimates Derived from Fuuy Land-Cover Classification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(4), 403-414.
- CASTILLO-MONROY, A. P., & MAESTRE, F. T. (2011). La costra biológica del suelo: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica. *Revista chilena de historia natural*, 84(1), 1-21.
- CHANDER, G., MARKHAM, B. L., & HELDER, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893-903.
- CHAVEZ, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 62(9), 1025-1035.
- CHEN, J., ZHANG, M. Y., WANG, L., SHIMAZAKI, H., & TAMURA, M. (2005). A new index for mapping lichen-dominated biological soil crusts in desert areas. *Remote Sensing of Environment*, 96(2), 165-175.
- CISNEROS, S. & ARANA, C. (2016). Variación a microescala espacial de la composición de microalgas de la costra biológica del suelo en la Reserva Nacional Lomas de Lachay, Lima. In *XXV Reunión Científica ICBAR - UNMSM*. Lima, Perú
- CLARK, R. N., & ROUSH, T. L. (1984). Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 6329-6340.
- CLARKE, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Austral Ecology*, 18(1), 117-143.
- CONCOSTRINA-ZUBIRI, L., MARTÍNEZ, I., HUBER-SANNWALD, E., & ESCUDERO, A. (2014). Efectos y respuestas de la costra biológica del suelo en ecosistemas áridos: avances recientes a nivel de especie. *Revista Ecosistemas*, 22(3), 95-100.

- CONGALTON, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 37(1), 35-46.
- CONGALTON, R. G., ODERWALD, R. G., & MEAD, R. A. (1983). Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 49(12), 1671-1678.
- COLESIE, C., FELDE, V. J. M. N. L., & BÜDEL, B. (2016). Composition and macrostructure of biological soil crusts. In *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands* (pp. 159-172). Springer, Cham.
- DILLON, M. O., & RUNDEL, P. W. (1990). The botanical response of the Atacama and Peruvian Desert floras to the 1982-83 El Niño event. In *Elsevier oceanography series* (Vol. 52, pp. 487-504). Elsevier.
- DIXON, P. (2003). VEGAN, a package of R functions for community ecology. *Journal of Vegetation Science*, 14(6), 927-930.
- ELBERT, W., WEBER, B., BURROWS, S., STEINKAMP, J., BÜDEL, B., ANDREAE, M. O., & PÖSCHL, U. (2012). Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen. *Nature Geoscience*, 5(7), 459.
- ELDRIDGE, D. J., BOWKER, M. A., MAESTRE, F. T., ALONSO, P., MAU, R. L., PAPADOPOULOS, J., & ESCUDERO, A. (2010). Interactive effects of three ecosystem engineers on infiltration in a semi-arid Mediterranean grassland. *Ecosystems*, 13(4), 499-510.
- ELLENBERG, H. (1959). Über den Wasserhaushalt tropischer Nebeloasen in der kustenwüste Perus. *Ber. Geobot. Forsch. Inst. Rubel fur 1958.*, 47-74.
- FERREYRA, R. (1953). Comunidades vegetales de algunas lomas costaneras del Perú. *Boletín de la Estación Experimental Agrícola "La Molina"*, 53, 1-88.
- FOODY, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment*, 80(1), 185-201.

- GAUCH, H. G., & GAUCH JR, H. G. (1982). *Multivariate analysis in community ecology*. Cambridge University Press.
- GOODALL, D. W. (1954). Objective methods for the classification of vegetation. III. An essay in the use of factor analysis. *Australian Journal of Botany*, 2(3), 304-324.
- HAY, A. M. (1988). The derivation of global estimates from a confusion matrix. *International Journal of Remote Sensing*, 9(8), 1395-1398.
- INRENA (2002). Plan Maestro de La Reserva Nacional de Lachay 2003-2007. Lima-Perú.
- INRENA (1994). Mapa Ecológico del Perú. Guía explicativa. Ministerio de Agricultura, Lima-Perú.
- JAMES, G., WITTEN, D., HASTIE, T., & TIBSHIRANI, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R* (Vol. 112). Springer Science+Business Media New York.
- KARNIELI, A., KIDRON, G. J., GLAESSER, C., & BEN-DOR, E. (1999). Spectral characteristics of cyanobacteria soil crust in semiarid environments. *Remote Sensing of Environment*, 69(1), 67-75.
- KARNIELI, A. (1997). Development and implementation of spectral crust index over dune sands. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6), 1207-1220.
- KARNIELI, A., & SARAFIS, V. (1996). Reflectance spectrophotometry of cyanobacteria within soil crusts—a diagnostic tool. *International Journal of Remote Sensing*, 17(8), 1609-1615.
- KARNIELI, A., & TSOAR, H. (1995). Spectral reflectance of biogenic crust developed on desert dune sand along the Israel-Egypt border. *Remote Sensing*, 16(2), 369-374.
- KERR, J. T., & OSTROVSKY, M. (2003). From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in ecology & evolution*, 18(6), 299-305.
- KIDRON, G. J., & TAL, S. Y. (2012). The effect of biocrusts on evaporation from sand dunes in the Negev Desert. *Geoderma*, 179, 104-112.

- KREBS, C. J. (1972). *Ecology, the Experimental Analysis of Distribution and Abundance*. Harper & Row, New York, NY.
- KRUSKAL, J. B. (1964). Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika*, 29(1), 1-27.
- LANDIS, J. R., & KOCH, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 159-174.
- LUDWIG, J. A., WILCOX, B. P., BRESHEARS, D. D., TONGWAY, D. J., & IMESON, A. C. (2005). Vegetation patches and runoff–erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. *Ecology*, 86(2), 288-297.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE. (2012). *Mapa de Tierras Secas del Perú. Memoria descriptiva*. Ministerio del Ambiente, Lima.
- MORIN, P. J. (2011). *Community ecology*. John Wiley & Sons, London.
- OKSANEN, J., BLANCHET, F. G., KINDT, R., LEGENDRE, P., MINCHIN, P. R., O'HARA, R. B., ... & OKSANEN, M. J. (2013). Package 'vegan'. *Community ecology package, version*, 2(9).
- OKSANEN, J., & TONTERI, T. (1995). Rate of compositional turnover along gradients and total gradient length. *Journal of Vegetation Science*, 6(6), 815-824.
- O'NEILL, A. L. (1994). Reflectance spectra of microphytic soil crusts in semi-arid Australia. *Remote Sensing*, 15(3), 675-681.
- ORDOÑEZ, J. L., & FAUSTINO, J. (1983). Evaluación del potencial hídrico en lomas costeras del Perú (Lomas de Lachay-Iguanil). *Zonas Áridas*, 3, 29-42.
- PINTO, R., BARRIA, I., & MARQUET, P. A. (2006). Geographical distribution of *Tillandsia lomas* in the Atacama Desert, northern Chile. *Journal of arid environments*, 65(4), 543-552.
- RENGIFO, M. C. (2017). *Efectos de las perturbaciones naturales de la costra biológica del suelo sobre la vegetación herbácea en la Reserva Nacional de Lachay, Perú* (Tesis de Título Profesional). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

- RODRÍGUEZ-CABALLERO, E., ESCRIBANO, P., OLEHOWSKI, C., CHAMIZO, S., HILL, J., CANTÓN, Y., & WEBER, B. (2017). Transferability of multi-and hyperspectral optical biocrust indices. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126, 94-107.
- RODRÍGUEZ-CABALLERO, E., ESCRIBANO, P., & CANTÓN, Y. (2014). Advanced image processing methods as a tool to map and quantify different types of biological soil crust. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 90, 59-67.
- ROSENTRETER, R., BOWKER, M., & BELNAP, J. (2007). A field guide to biological soil crusts of western US drylands: common lichens and bryophytes. *Bureau of Land Management*, 1.
- RUNDEL, P. W., DILLON, M. O., PALMA, B., MOONEY, H. A., GULMON, S. L., & EHLERINGER, J. R. (1991). The phytogeography and ecology of the coastal Atacama and Peruvian deserts. *Aliso: A Journal of Systematic and Evolutionary Botany*, 13(1), 1-49.
- SERNANP (2013). Plan Maestro de La Reserva Nacional de Lachay 2013-2018. Lima-Perú.
- STORY, M., & CONGALTON, R. G. (1986). Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, 52(3), 397-399.
- TROMP, M., & STEENIS, Z. (1995). Deriving sub-pixel soil characteristics in northern Burkina Faso with spectral unmixing. In *proceedings of the ISSS International Symposium (Working Group RS and DM) on Monitoring Soils in the Environment with Remote Sensing and GIS* (pp. 269-284).
- TURNER, W., SPECTOR, S., GARDINER, N., FLADELAND, M., STERLING, E., & STEININGER, M. (2003). Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in ecology & evolution*, 18(6), 306-314.

- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (2015). Using the USGS Landsat 8 Product. U.S. Department of the Interior. Disponible en Web: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php
- VAPNIK, V. (2005). Universal learning technology: Support vector machines. *NEC Journal of Advanced Technology*, 2(2), 137-144.
- WEBER, B., OLEHOWSKI, C., KNERR, T., HILL, J., DEUTSCHEWITZ, K., WESSELS, D. C. J., ... & BÜDEL, B. (2008). A new approach for mapping of biological soil crusts in semidesert areas with hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2187-2201.
- WEGMANN, M., LEUTNER, B., & DECH, S. (Eds.). (2016). *Remote sensing and GIS for ecologists: using open source software*. Pelagic Publishing Ltd.
- WESSELS, D. C. J., & VAN VUUREN D. R. J. (1986). Landsat imagery-its possible use in mapping the distribution of major lichen communities in the Namib Desert, South West Africa. *Madoqua*, 14(4), 369-373.
- WHITTAKER, R. H. (1965). Dominance and diversity in land plant communities: numerical relations of species express the importance of competition in community function and evolution. *Science*, 147(3655), 250-260.
- WILLIAMS, A. J., BUCK, B. J., SOUKUP, D. A., & MERKLER, D. J. (2013). Geomorphic controls on biological soil crust distribution: a conceptual model from the Mojave Desert (USA). *Geomorphology*, 195, 99-109.
- WILLIAMS, A. J., BUCK, B. J., & BEYENE, M. A. (2012). Biological soil crusts in the Mojave Desert, USA: micromorphology and pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal*, 76(5), 1685-1695.
- WILSON, M. V., & MOHLER, C. L. (1983). Measuring compositional change along gradients. *Vegetatio*, 54(3), 129-141.

YUAN, F., SAWAYA, K. E., LOEFFELHOLZ, B. C., & BAUER, M. E. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 98(2-3), 317-328.

XI. ANEXOS

Anexo I: Mapa Base Reserva Nacional de Lachay

Ministerio del Ambiente – Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el

Estado – 2015

Fuentes: SERNANP, IGN, INEI, MTC.

**Anexo II: Clasificación de diferentes tipos de Costra Biológica del Suelo
sugerida por Belnap *et al.*, (2001).**

Textura de Superficie	Apariencia de Biocostra	Grupo de organismos dominantes	Grosor
Lisa	Clara	Cianobacteria, alga verde	0.2 mm
	Oscura	Cianobacteria, alga verde	
Rugosa		Musgo y Liquen	2-4 mm
Ondulada	Delgada	Liquen	5-50 mm
	Gruesa	Musgo	
Pinaculada		Cianobacteria, liquen, musgo	6-150 mm

**Anexo III: Clasificación de los tipos de Costra Biológica del Suelo planteado por
Williams *et al.*, (2012).**

Morfotipo de CBS	Textura la superficie	Apariencia de Biocostra	Grupo de organismos dominantes	Grosor
Costra dominada por Cianobacteria	Lisa	Clara	Cianobacteria filamentosa	1.5 mm
Costra corta de musgo y liquen	Ondulada	Oscura	>50% cubierto de musgo y liquen, un poco de Cianobacteria	hasta 11 mm
Costra alta de musgo y liquen	Pinaculada	Oscura	>50% cubierto de musgo y liquen, un poco de Cianobacteria	hasta 220 mm

Anexo IV: Base de datos: Colección de información obtenida de las parcelas.

**Matriz con variables: proporción de cobertura por grupo funcional, altitud,
resistencia mecánica a la penetración.**

Parcela	Penetración (Kg/cm²)	Altura (m)	Arena	Alga	Musgo	Liquen	MO Vegetal
ARENA 01	0	97	1	0	0	0	0
ARENA 02	0	89	1	0	0	0	0
ARENA 03	0	88	1	0	0	0	0
ARENA 04	0	83	1	0	0	0	0
ARENA 05	0	83	1	0	0	0	0
ARENA 06	0	94	1	0	0	0	0
ARENA 07	0	105	1	0	0	0	0
ARENA 08	0	107	1	0	0	0	0
ARENA 09	0	111	1	0	0	0	0
ARENA 10	0	116	1	0	0	0	0
ARENA 11	0	117	1	0	0	0	0
ARENA 12	0	121	1	0	0	0	0
ARENA 13	0	116	1	0	0	0	0
ARENA 14	0	118	1	0	0	0	0
ARENA 15	0	118	1	0	0	0	0
ARENA 16	0.4	120	1	0	0	0	0
ARENA 17	0.3	123	0.8	0.2	0	0	0
ARENA 18	0.19	125	0.8	0.2	0	0	0
ARENA 19	0.218	127	0.7	0.3	0	0	0
ARENA 20	0.228	126	0.8	0.2	0	0	0
CBS LC 01	0.27	128	0.5	0.5	0	0	0
CBS LC 02	0.28	132	0.4	0.6	0	0	0
CBS LC 03	0.28	135	0.4	0.6	0	0	0
CBS LC 04	0.22	137	0.4	0.6	0	0	0
CBS LC 05	0.2	139	0.5	0.5	0	0	0
CBS LC 06	0.17	145	0.5	0.5	0	0	0
CBS LC 07	0.41	148	0.3	0.7	0	0	0
CBS LC 08	0.23	156	0.4	0.6	0	0	0
CBS LC 09	0.25	158	0.3	0.7	0	0	0
CBS LC 10	0.3	162	0.6	0.4	0	0	0
CBS LC 11	0.29	165	0.2	0.8	0	0	0
CBS LC 12	0.16	165	0.6	0.4	0	0	0
CBS LC 13	0.4	168	0.5	0.5	0	0	0
CBS LC 14	0.48	172	0.5	0.5	0	0	0
CBS LC 15	0.88	176	0.4	0.6	0	0	0
CBS LC 16	1.26	180	0.3	0.7	0	0	0
CBS LC 17	0.47	121	0.6	0.4	0	0	0
CBS LC 18	0.88	122	0.4	0.5	0	0.1	0
CBS LC 19	0.54	121	0.3	0.7	0	0	0
CBS LC 20	0.74	119	0.4	0.6	0	0	0
CBS LO 01	1.13	182	0.1	0.5	0.4	0	0
CBS LO 02	1.82	185	0.1	0.5	0.4	0	0
CBS LO 03	1.37	186	0	0.5	0.5	0	0
CBS LO 04	1.41	186	0	0.4	0.6	0	0
CBS LO 05	1.22	186	0	0.4	0.6	0	0

Parcela	Penetración (Kg/cm²)	Altura (m)	Arena	Alga	Musgo	Liquen	MO Vegetal
CBS LO 06	2.27	186	0	0.3	0.6	0.1	0
CBS LO 07	1.95	190	0	0.3	0.6	0.1	0
CBS LO 08	3.23	193	0	0.1	0.8	0.1	0
CBS LO 09	3.44	194	0	0.1	0.8	0.1	0
CBS LO 10	2.33	191	0	0	0.9	0.1	0
CBS LO 11	1.76	122	0.1	0.4	0.2	0.3	0
CBS LO 12	2.14	125	0.1	0.4	0.15	0.35	0
CBS LO 13	1.96	122	0.05	0.6	0.25	0.1	0
CBS LO 14	1.9	125	0.1	0.4	0.3	0.2	0
CBS LO 15	1.56	125	0.1	0.3	0.4	0.1	0.1
CBS LO 16	1.82	125	0.1	0.3	0.4	0.1	0.1
CBS LO 17	2.82	123	0	0.3	0.5	0.1	0.1
CBS LO 18	4.16	122	0	0.2	0.6	0.1	0.1
CBS LO 19	3.12	123	0	0.2	0.6	0.1	0.1
CBS LO 20	3.38	127	0	0.1	0.6	0.1	0.2
CBS R 01	1.78	196	0	0	0.9	0.1	0
CBS R 02	3.28	199	0	0	1	0	0
CBS R 03	2.3	201	0	0	1	0	0
CBS R 04	1.84	201	0	0	0.9	0.1	0
CBS R 05	1.37	199	0	0.1	0.8	0.1	0
CBS R 06	1.82	201	0	0.1	0.8	0.1	0
CBS R 07	2.92	201	0	0	0.9	0.1	0
CBS R 08	2.44	205	0	0	0.9	0.1	0
CBS R 09	1.84	200	0	0.1	0.8	0.1	0
CBS R 10	1.73	206	0	0	0.6	0.4	0
CBS R 11	2.41	206	0	0	0.9	0	0.1
CBS R 12	2.73	206	0	0	0.9	0	0.1
CBS R 13	2.04	209	0	0	0.8	0.1	0.1
CBS R 14	2.05	210	0	0	0.8	0.1	0.1
CBS R 15	2.26	211	0	0	0.8	0.1	0.1
CBS R 16	3.79	211	0	0	0.8	0.1	0.1
CBS R 17	3.68	213	0	0	0.8	0.1	0.1
CBS R 18	2.78	214	0	0	0.8	0.1	0.1
CBS R 19	2.6	217	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 20	3.41	217	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 21	3.05	216	0	0	0.8	0.1	0.1
CBS R 22	1.77	221	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 23	1.76	221	0	0	0.65	0.1	0.25
CBS R 24	2.83	222	0	0	0.6	0.1	0.3
CBS R 25	1.33	224	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 26	1.41	226	0	0	0.6	0.1	0.3
CBS R 27	1.22	226	0	0	0.6	0.1	0.3
CBS R 28	2.45	228	0	0	0.55	0.1	0.35
CBS R 29	2.58	229	0	0	0.6	0.1	0.3
CBS R 30	2.54	130	0	0	0.7	0.1	0.2

Parcela	Penetración (Kg/cm²)	Altura (m)	Arena	Alga	Musgo	Liquen	MO Vegetal
CBS R 31	2.18	133	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 32	2.98	135	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 33	2.22	137	0.1	0	0.6	0.1	0.2
CBS R 34	0.92	139	0.3	0	0.5	0.1	0.1
CBS R 35	3.3	138	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 36	2.58	144	0	0	0.6	0.1	0.3
CBS R 37	3.5	147	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 38	3.22	151	0	0	0.6	0.2	0.2
CBS R 39	3.42	156	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 40	3.64	161	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 41	3.1	167	0	0	0.7	0.1	0.2
CBS R 42	1.92	173	0	0	0.6	0.1	0.3
CBS R 43	1.8	178	0	0	0.5	0.1	0.4
CBS R 44	1.22	183	0	0	0.5	0.1	0.4
CBS R 45	1.16	189	0	0	0.5	0.1	0.4
CBS R 46	1.34	201	0	0	0.5	0.1	0.4
CBS R MO 01	1.9	229	0	0	0.6	0	0.4
CBS R MO 02	1.44	230	0	0	0.6	0	0.4
CBS R MO 03	2.52	230	0	0	0.6	0	0.4
CBS R MO 04	1.36	232	0	0	0.7	0	0.3
CBS R MO 05	1.31	232	0	0	0.6	0	0.4
CBS R MO 06	1.31	234	0	0	0.55	0	0.45
CBS R MO 07	1.06	233	0	0	0.55	0	0.45
CBS R MO 08	1.02	233	0	0	0.5	0	0.5
CBS R MO 09	0.66	233	0	0	0.5	0	0.5
CBS R MO 10	0.78	234	0	0	0.5	0	0.5
CBS R MO 11	0.88	235	0	0	0.5	0	0.5
CBS R MO 12	1.66	215	0	0	0.6	0.1	0.3
CBS R MO 13	1.56	222	0	0	0.5	0.1	0.4
CBS R MO 14	2.26	227	0	0	0.6	0.1	0.3
CBS R MO 15	1.82	233	0	0	0.6	0.1	0.3
CBS R MO 16	1.96	237	0	0	0.5	0.1	0.4
CBS R MO 17	1.84	245	0	0	0.5	0	0.5
CBS R MO 18	1.62	248	0	0	0.4	0	0.6
CBS R MO 19	1.6	253	0	0	0.5	0	0.5
CBS R MO 20	1.46	255	0	0	0.4	0	0.6
CBS R MO 21	1.32	256	0	0	0.4	0	0.6
CBS R MO 22	1.6	259	0	0	0.4	0	0.6
CBS R MO 23	1.4	262	0	0	0.3	0	0.7
CBS R MO 24	1.46	262	0	0	0.3	0	0.7
CBS R MO 25	1.3	264	0	0	0.3	0	0.7
CBS R MO 26	1.56	267	0	0	0.4	0	0.6
CBS R MO 27	1.56	271	0	0	0.4	0	0.6
CBS R MO 28	1.42	275	0	0	0.4	0	0.6
CBS R MO 29	1.34	277	0	0	0.4	0	0.6

Parcela	Penetración (Kg/cm ²)	Altura (m)	Arena	Alga	Musgo	Liquen	MO Vegetal
CBS R MO 30	1.42	278	0	0	0.4	0	0.6
CBS R VEG 01	1.03	236	0	0	0.5	0	0.5
CBS R VEG 02	0.89	237	0	0	0.5	0	0.5
CBS R VEG 03	0.85	238	0	0	0.45	0	0.55
CBS R VEG 04	1.01	238	0	0	0.45	0	0.55
CBS R VEG 05	0.8	240	0	0	0.4	0	0.6
CBS R VEG 06	0.93	241	0	0	0.4	0	0.6
CBS R VEG 07	0.79	241	0	0	0.4	0	0.6
CBS R VEG 08	1	242	0	0	0.4	0	0.6
CBS R VEG 09	1.25	241	0	0	0.5	0	0.5
CBS R VEG 10	1.21	244	0	0	0.5	0	0.5
CBS R VEG 11	0.74	246	0	0	0.45	0	0.55
CBS R VEG 12	0.54	247	0	0	0.45	0	0.55
CBS R VEG 13	0.59	247	0	0	0.45	0	0.55
CBS R VEG 14	0.74	248	0	0	0.4	0	0.6
CBS R VEG 15	0.64	249	0	0	0.35	0	0.65
CBS R VEG 16	0.69	251	0	0	0.35	0	0.65
CBS R VEG 17	0.71	253	0	0	0.3	0	0.7
CBS R VEG 18	0.77	255	0	0	0.3	0	0.7
CBS R VEG 19	1.17	258	0	0	0.3	0	0.7
CBS R VEG 20	0.82	260	0	0	0.25	0	0.75
CBS R VEG 21	0.87	263	0	0	0.2	0	0.8
CBS R VEG 22	0.79	266	0	0	0.2	0	0.8
CBS R VEG 23	0.92	268	0	0	0.2	0	0.8
CBS R VEG 24	1.1	270	0	0	0.15	0	0.85
CBS R VEG 25	0.85	272	0	0	0.15	0	0.85
CBS R VEG 26	0.64	273	0	0	0.15	0	0.85

CBS LC = costra biológica del suelo lisa clara, CBS LO = costra biológica del suelo lisa oscura, CBS R = costra biológica del suelo rugosa-ondulante, CBS R MO = costra biológica del suelo rugosa con materia orgánica, CBS R VEG = costra biológica del suelo rugosa con vegetación persistente.

Anexo V: Base de datos: Colección de información obtenida de los pixeles de la imagen satelital. Datos para ENTRENAMIENTO.

Matriz con variables: energía reflejada por tipo de banda.

SUPERFICIE	BANDA 2 (μm)	BANDA 3 (μm)	BANDA 4 (μm)	BANDA 5 (μm)	BANDA 6 (μm)	BANDA 7 (μm)
ARENA	0.1391590	0.1804090	0.2258100	0.2756570	0.3095585	0.2720160
ARENA	0.1449460	0.1857200	0.2312160	0.2821120	0.3192290	0.2808040
ARENA	0.1314660	0.1694290	0.2128770	0.2638680	0.3054860	0.2699910
ARENA	0.1197720	0.1531620	0.1912740	0.2345960	0.2673770	0.2362420
ARENA	0.1209150	0.1534720	0.1927750	0.2348110	0.2686150	0.2376710
ARENA	0.1202480	0.1537820	0.1913460	0.2327390	0.2694490	0.2399100
ARENA	0.1230580	0.1562110	0.1949900	0.2378830	0.2760940	0.2464600
ARENA	0.1225820	0.1569020	0.1963950	0.2409790	0.2801910	0.2502470
ARENA	0.1243445	0.1568300	0.1959190	0.2402890	0.2717360	0.2384810
ARENA	0.1211050	0.1512570	0.1885830	0.2306660	0.2573020	0.2251670
ARENA	0.1192950	0.1499950	0.1865110	0.2279275	0.2536340	0.2236660
ARENA	0.1198670	0.1498040	0.1865580	0.2280230	0.2530860	0.2234040
ARENA	0.1169610	0.1465170	0.1830100	0.2233550	0.2483460	0.2208080
ARENA	0.1169850	0.1472320	0.1825570	0.2229970	0.2516570	0.2249050
ARENA	0.1161040	0.1461840	0.1810800	0.2196390	0.2496325	0.2235230
ARENA	0.1159850	0.1455650	0.1809610	0.2204010	0.2485370	0.2225710
ARENA	0.1167470	0.1463750	0.1826760	0.2219490	0.2501800	0.2236425
ARENA	0.1159370	0.1459220	0.1813190	0.2211630	0.2501330	0.2233330
ARENA	0.1153890	0.1444220	0.1796750	0.2184480	0.2484890	0.2229040
ARENA	0.1153180	0.1444930	0.1801750	0.2200680	0.2496090	0.2240000
CBS LC	0.1161750	0.1461360	0.1812470	0.2229970	0.2556110	0.2298110
CBS LC	0.1142940	0.1429450	0.1776750	0.2165190	0.2461070	0.2210230
CBS LC	0.1152940	0.1458740	0.1809850	0.2214970	0.2566110	0.2303830
CBS LC	0.1191050	0.1500900	0.1869870	0.2296660	0.2658290	0.2380520
CBS LC	0.1179850	0.1490420	0.1855820	0.2273800	0.2586360	0.2330740
CBS LC	0.1116740	0.1400870	0.1740780	0.2140660	0.2432020	0.2194740
CBS LC	0.1050530	0.1324890	0.1647180	0.2033240	0.2357940	0.2130200
CBS LC	0.1036480	0.1298930	0.1620980	0.2100410	0.2473700	0.2226180
CBS LC	0.1156750	0.1479460	0.1874870	0.2392880	0.2796670	0.2475550
CBS LC	0.1155560	0.1466600	0.1832720	0.2356920	0.2780950	0.2456020
CBS LO	0.0986700	0.1232720	0.1539520	0.2009900	0.2374850	0.2141155
CBS LO	0.0958596	0.1182470	0.1458070	0.1911540	0.2272910	0.2049220
CBS LO	0.0910486	0.1107450	0.1371370	0.1815080	0.2226230	0.2002300
CBS LO	0.0834987	0.0980028	0.1198940	0.1617390	0.2014250	0.1796750
CBS LO	0.0809741	0.0931918	0.1122240	0.1533560	0.1919450	0.1709820
CBS LO	0.0792593	0.0892383	0.1071990	0.1482350	0.1862530	0.1652180
CBS LO	0.0892862	0.1076010	0.1313740	0.1824600	0.2321980	0.2078040
CBS LO	0.0703756	0.0744481	0.0884545	0.1277760	0.1718190	0.1578590
CBS LO	0.0693515	0.0757580	0.0906934	0.1346830	0.1775830	0.1576680
CBS LO	0.0665887	0.0725904	0.0864301	0.1274900	0.1643640	0.1461410

SUPERFICIE	BANDA 2 (μm)	BANDA 3 (μm)	BANDA 4 (μm)	BANDA 5 (μm)	BANDA 6 (μm)	BANDA 7 (μm)
CBS R	0.0698517	0.0759485	0.0900265	0.1285620	0.1667700	0.1449260
CBS R	0.0639689	0.0679699	0.0801184	0.1152480	0.1467630	0.1278730
CBS R	0.0661839	0.0712804	0.0849772	0.1220600	0.1599100	0.1394000
CBS R	0.0652074	0.0703992	0.0841198	0.1208450	0.1577670	0.1362560
CBS R	0.0637307	0.0679937	0.0816904	0.1196540	0.1566710	0.1346840
CBS R	0.0630400	0.0664218	0.0794754	0.1180590	0.1552420	0.1326120
CBS R	0.0620636	0.0662075	0.0789990	0.1175350	0.1555750	0.1334700
CBS R	0.0620397	0.0658979	0.0789276	0.1169630	0.1535750	0.1316600
CBS R	0.0595390	0.0623730	0.0747119	0.1133910	0.1533130	0.1300160
CBS R	0.0606822	0.0644450	0.0775700	0.1168680	0.1570280	0.1330170
CBS R	0.0601106	0.0629684	0.0757837	0.1137950	0.1558850	0.1314930
CBS R	0.0588245	0.0605153	0.0715918	0.1098180	0.1511930	0.1268010
CBS R	0.0590150	0.0606820	0.0728780	0.1114610	0.1533840	0.1284440
CBS R	0.0696373	0.0752102	0.0895263	0.1280140	0.1615775	0.1425440
CBS R	0.0723286	0.0767345	0.0923368	0.1361840	0.1714380	0.1526430
CBS R	0.0650645	0.0691846	0.0829289	0.1214650	0.1508590	0.1332550
CBS R	0.0627304	0.0659217	0.0783798	0.1178680	0.1461430	0.1275870
CBS R	0.0624446	0.0653501	0.0776414	0.1180350	0.1459770	0.1265390
CBS R	0.0629924	0.0668982	0.0797850	0.1183680	0.1467390	0.1257530
CBS R	0.0627781	0.0663742	0.0791181	0.1179870	0.1480730	0.1255620
CBS R	0.0617777	0.0641354	0.0755455	0.1081510	0.1410940	0.1210370
CBS R	0.0630400	0.0675650	0.0808568	0.1139860	0.1499540	0.1290400
CBS R	0.0593484	0.0616347	0.0734496	0.1081750	0.1487160	0.1270390
CBS R MO	0.0602535	0.0620634	0.0741641	0.1125330	0.1596480	0.1333980
CBS R MO	0.0604678	0.0625635	0.0749739	0.1145100	0.1631970	0.1366140
CBS R MO	0.0624684	0.0659455	0.0798088	0.1220600	0.1768920	0.1473790
CBS R MO	0.0654455	0.0700658	0.0850010	0.1296580	0.1871820	0.1555250
CBS R MO	0.0662077	0.0708994	0.0864062	0.1328490	0.1911590	0.1591450
CBS R MO	0.0538706	0.0540609	0.0646848	0.0970281	0.1357350	0.1121290
CBS R MO	0.0549661	0.0547278	0.0653040	0.0987906	0.1419990	0.1161780
CBS R MO	0.0553472	0.0557281	0.0667331	0.0988144	0.1421900	0.1178930
CBS R MO	0.0560379	0.0560139	0.0669712	0.0997671	0.1446430	0.1189170
CBS R MO	0.0552519	0.0552280	0.0654946	0.0970043	0.1376400	0.1142250
CBS R MO	0.0549661	0.0553232	0.0653040	0.0971234	0.1356400	0.1132720
CBS R MO	0.0550376	0.0557281	0.0660900	0.0986715	0.1415230	0.1174640
CBS R MO	0.0550138	0.0553947	0.0663758	0.0995527	0.1423800	0.1180840
CBS R MO	0.0563951	0.0571095	0.0683050	0.1014820	0.1470490	0.1235620
CBS R MO	0.0566333	0.0573715	0.0688528	0.1019110	0.1468580	0.1241330
CBS R VEG	0.0647548	0.0692084	0.0846199	0.1300630	0.1877530	0.1575010
CBS R VEG	0.0650406	0.0694465	0.0851439	0.1294195	0.1848480	0.1551910

SUPERFICIE	BANDA 2 (μm)	BANDA 3 (μm)	BANDA 4 (μm)	BANDA 5 (μm)	BANDA 6 (μm)	BANDA 7 (μm)
CBS R VEG	0.0633020	0.0667076	0.0808330	0.1267280	0.1846090	0.1538340
CBS R VEG	0.0628257	0.0664218	0.0806901	0.1253710	0.1839900	0.1525240
CBS R VEG	0.0625399	0.0649452	0.0793325	0.1243700	0.1816800	0.1513090
CBS R VEG	0.0648263	0.0687321	0.0846199	0.1294430	0.1862530	0.1533330
CBS R VEG	0.0646119	0.0691369	0.0847867	0.1306340	0.1878725	0.1529285
CBS R VEG	0.0641832	0.0687321	0.0842150	0.1292050	0.1843470	0.1496420
CBS R VEG	0.0640165	0.0680890	0.0837149	0.1297290	0.1882770	0.1518810
CBS R VEG	0.0654455	0.0698276	0.0864062	0.1327540	0.1932320	0.1557150
CBS R VEG	0.0660886	0.0710423	0.0879306	0.1369700	0.2004480	0.1620980
CBS R VEG	0.0669222	0.0723760	0.0901456	0.1398510	0.2061890	0.1661000
CBS R VEG	0.0654694	0.0703992	0.0889309	0.1392560	0.2112620	0.1683380
VEGETACION	0.0551090	0.0617299	0.0814999	0.1619300	0.2453450	0.1785080
VEGETACION	0.0543469	0.0602771	0.0782131	0.1606680	0.2289350	0.1637650
VEGETACION	0.0542040	0.0596579	0.0754741	0.1629065	0.2065220	0.1450450
VEGETACION	0.0486309	0.0552518	0.0693053	0.1515220	0.1824900	0.1298260
VEGETACION	0.0480831	0.0530845	0.0640655	0.1665510	0.1661740	0.1114385
VEGETACION	0.0514889	0.0576811	0.0720920	0.1621680	0.2035450	0.1420440
VEGETACION	0.0526797	0.0573953	0.0736401	0.1503070	0.2188120	0.1563340
VEGETACION	0.0533942	0.0588481	0.0771413	0.1470440	0.2260530	0.1650520
VEGETACION	0.0515603	0.0556328	0.0719252	0.1430670	0.2165260	0.1586920
VEGETACION	0.0483927	0.0529416	0.0684003	0.1370650	0.2130960	0.1554770

CBS LC = costra biológica del suelo lisa clara, CBS LO = costra biológica del suelo lisa oscura, CBS R = costra biológica del suelo rugosa-ondulante, CBS R MO = costra biológica del suelo rugosa con materia orgánica, CBS R VEG = costra biológica del suelo rugosa con vegetación persistente.

Anexo VI: Base de datos: Colección de información obtenida de los pixeles de la imagen satelital. Datos para PRUEBA.

Matriz con variables: energía reflejada por tipo de banda.

SUPERFICIE	BANDA 2 (μm)	BANDA 3 (μm)	BANDA 4 (μm)	BANDA 5 (μm)	BANDA 6 (μm)	BANDA 7 (μm)
CBS LC	0.1156280	0.1449220	0.1807470	0.2199960	0.2513710	0.2257380
CBS LC	0.1156510	0.1455890	0.1810570	0.2212350	0.2543720	0.2284770
CBS LC	0.1138890	0.1434690	0.1775555	0.2161620	0.2467270	0.2210700
CBS LC	0.1136510	0.1427780	0.1775790	0.2168290	0.2460120	0.2213560
CBS LC	0.1078390	0.1347520	0.1682190	0.2077305	0.2370330	0.2152350
CBS LC	0.1058150	0.1326085	0.1646700	0.2047770	0.2394380	0.2158300
CBS LC	0.1053625	0.1346090	0.1683620	0.2116840	0.2498470	0.2259290
CBS LC	0.1057440	0.1331090	0.1663850	0.2131610	0.2530385	0.2276200
CBS LC	0.1182240	0.1531620	0.1945370	0.2461480	0.2845260	0.2512470
CBS LC	0.1174610	0.1522570	0.1903450	0.2417180	0.2826200	0.2494370
CBS LO	0.0910962	0.1086250	0.1340410	0.1789350	0.2134050	0.1914650
CBS LO	0.0835225	0.0978837	0.1201790	0.1627400	0.2011150	0.1796280
CBS LO	0.0745197	0.0819980	0.0981006	0.1374700	0.1734390	0.1540000
CBS LO	0.0703518	0.0776633	0.0924797	0.1297290	0.1686990	0.1483080
CBS LO	0.0817600	0.0918105	0.1106290	0.1610730	0.2113330	0.1904170
CBS LO	0.0848086	0.0968358	0.1174640	0.1685040	0.2163830	0.1935850
CBS LO	0.0775207	0.0886667	0.1066510	0.1514980	0.1986860	0.1807950
CBS LO	0.0753533	0.0837366	0.1001250	0.1418280	0.1853480	0.1684340
CBS LO	0.0696849	0.0769726	0.0911697	0.1320160	0.1798700	0.1614790
CBS LO	0.0682321	0.0746386	0.0884069	0.1270620	0.1583860	0.1398050
CBS R	0.0719237	0.0787351	0.0950043	0.1328250	0.1675080	0.1468310
CBS R	0.0690895	0.0739003	0.0875733	0.1244890	0.1608390	0.1413290
CBS R	0.0673747	0.0736145	0.0878591	0.1268710	0.1658890	0.1440680
CBS R	0.0675176	0.0728762	0.0861204	0.1233700	0.1605530	0.1405430
CBS R	0.0659933	0.0704945	0.0829051	0.1196540	0.1558140	0.1362560
CBS R	0.0657313	0.0700182	0.0832385	0.1200360	0.1571000	0.1365180
CBS R	0.0660648	0.0712090	0.0853345	0.1222270	0.1591480	0.1380900
CBS R	0.0665887	0.0700182	0.0831195	0.1193450	0.1536460	0.1332790
CBS R	0.0635640	0.0666600	0.0788799	0.1149150	0.1497880	0.1287300
CBS R	0.0641356	0.0683510	0.0816428	0.1183680	0.1547420	0.1336840
CBS R	0.0633735	0.0676841	0.0811426	0.1178205	0.1533840	0.1317790
CBS R	0.0624446	0.0663742	0.0799279	0.1165110	0.1537650	0.1315400
CBS R	0.0614205	0.0650881	0.0781654	0.1160100	0.1525980	0.1299210
CBS R	0.0601344	0.0639211	0.0764744	0.1161060	0.1550510	0.1314210
CBS R	0.0607536	0.0643974	0.0773080	0.1165340	0.1556710	0.1323740
CBS R	0.0608965	0.0640878	0.0773795	0.1166770	0.1585530	0.1341130
CBS R	0.0730907	0.0824981	0.0986008	0.1399710	0.1708430	0.1496420
CBS R	0.0676843	0.0721617	0.0857870	0.1246560	0.1622920	0.1432350
CBS R	0.0773778	0.0832841	0.0999107	0.1440670	0.1819180	0.1573110
CBS R	0.0631353	0.0666362	0.0791181	0.1197020	0.1466200	0.1262770

SUPERFICIE	BANDA 2 (μm)	BANDA 3 (μm)	BANDA 4 (μm)	BANDA 5 (μm)	BANDA 6 (μm)	BANDA 7 (μm)
CBS R	0.0625161	0.0657311	0.0783560	0.1152480	0.1459770	0.1233000
CBS R	0.0617301	0.0649452	0.0768078	0.1113900	0.1416660	0.1198940
CBS R	0.0616110	0.0655644	0.0782607	0.1124850	0.1507880	0.1303260
CBS R MO	0.0598724	0.0620872	0.0749977	0.1127240	0.1584100	0.1321835
CBS R MO	0.0601582	0.0627541	0.0747595	0.1133910	0.1597910	0.1342560
CBS R MO	0.0600153	0.0617299	0.0739021	0.1123660	0.1583860	0.1329460
CBS R MO	0.0595390	0.0618014	0.0738068	0.1115570	0.1581240	0.1324690
CBS R MO	0.0603487	0.0625873	0.0752359	0.1149150	0.1651030	0.1378040
CBS R MO	0.0609442	0.0633257	0.0764029	0.1165340	0.1691750	0.1411150
CBS R MO	0.0565857	0.0571571	0.0683050	0.1028630	0.1407370	0.1176790
CBS R MO	0.0550852	0.0561806	0.0661614	0.0998385	0.1379500	0.1146780
CBS R MO	0.0553472	0.0557758	0.0667807	0.1003860	0.1417850	0.1172500
CBS R MO	0.0544422	0.0542753	0.0646371	0.0977902	0.1361400	0.1125340
CBS R MO	0.0549423	0.0546564	0.0651611	0.0986476	0.1400940	0.1143440
CBS R MO	0.0557045	0.0562283	0.0676858	0.1028630	0.1478350	0.1218940
CBS R MO	0.0552758	0.0562759	0.0669712	0.1012680	0.1470490	0.1206080
CBS R MO	0.0560379	0.0562044	0.0670189	0.1002910	0.1446670	0.1197270
CBS R MO	0.0558950	0.0569904	0.0680907	0.1020540	0.1472150	0.1219420
CBS R VEG	0.0646119	0.0693513	0.0852392	0.1288720	0.1854190	0.1553580
CBS R VEG	0.0650883	0.0699943	0.0851916	0.1295620	0.1867050	0.1567870
CBS R VEG	0.0651121	0.0687321	0.0836196	0.1288960	0.1868720	0.1564300
CBS R VEG	0.0631115	0.0668029	0.0809997	0.1248470	0.1846330	0.1523810
CBS R VEG	0.0633973	0.0672792	0.0818809	0.1267040	0.1864670	0.1546670
CBS R VEG	0.0654694	0.0693989	0.0850963	0.1294670	0.1877530	0.1555480
CBS R VEG	0.0641832	0.0681605	0.0837625	0.1289190	0.1851570	0.1503090
CBS R VEG	0.0641832	0.0682557	0.0834767	0.1287530	0.1843950	0.1496890
CBS R VEG	0.0644452	0.0683034	0.0841436	0.1287290	0.1850620	0.1500470
CBS R VEG	0.0647548	0.0688511	0.0846914	0.1294670	0.1877300	0.1520470
CBS R VEG	0.0640642	0.0681605	0.0848343	0.1300630	0.1896110	0.1536190
CBS R VEG	0.0650883	0.0696133	0.0868826	0.1363500	0.2054030	0.1647660
CBS R VEG	0.0658266	0.0699705	0.0869779	0.1344210	0.1971620	0.1603360

CBS LC = costra biológica del suelo lisa clara, CBS LO = costra biológica del suelo lisa oscura, CBS R = costra biológica del suelo rugosa-ondulante, CBS R MO = costra biológica del suelo rugosa con materia orgánica, CBS R VEG = costra biológica del suelo con vegetación persistente.

Anexo VII: Tabla comparativa de la Normalidad de las muestras categorizadas por superficie y las variables mediante el test estadístico Shapiro-Wilk. Para valores cuyo *p-value* son mayores a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula. H_0 : La muestra viene de una población con distribución normal.

	ARENA	CBS LC	CBS LO	CBS R	CBS R MO	CBS R VEG	VEGETACIÓN
Penetración	****	**	0.1139	0.2486	0.3044	0.5681	-
Altitud	*	0.1649	****	****	*	*	-
Banda 2	***	**	0.339	**	***	0.9126	0.1986
Banda 3	***	0.1256	0.178	**	***	0.7398	0.7303
Banda 4	***	0.4221	0.1551	**	***	0.4766	0.9984
Banda 5	***	0.3089	0.1476	***	***	**	0.3333
Banda 6	***	*	0.5546	*	**	****	0.7364
Banda 7	***	0.0812	0.6451	*	**	**	0.6681

Anexo VIII: Prueba U Mann-Whitney (Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon) para dos muestras independientes pareada por bandas.

BANDA 2**U Mann-Whitney :**

SUPERFICIES	<i>p - value</i>
ARENA - CBS LC	***
ARENA - CBS LO	****
ARENA - CBS R	****
ARENA - CBS R MO	****
ARENA - CBS R VEG	****
ARENA - VEGETACION	****
CBS LC - CBS LO	****
CBS LC - CBS R	****
CBS LC - CBS R MO	****
CBS LC - CBS R VEG	****
CBS LC - VEGETACION	****
CBS LO - CBS R	****
CBS LO - CBS R MO	****
CBS LO - CBS R VEG	****
CBS LO - VEGETACION	****
CBS R - CBS R MO	****
CBS R - CBS R VEG	0.095
CBS R - VEGETACION	****
CBS R MO - CBS R VEG	****
CBS R MO - VEGETACION	****
CBS R VEG - VEGETACION	****

BANDA 3**U Mann-Whitney :**

SUPERFICIES	<i>p - value</i>
ARENA - CBS LC	***
ARENA - CBS LO	****
ARENA - CBS R	****
ARENA - CBS R MO	****
ARENA - CBS R VEG	****
ARENA - VEGETACION	****
CBS LC - CBS LO	****
CBS LC - CBS R	****
CBS LC - CBS R MO	****
CBS LC - CBS R VEG	****
CBS LC - VEGETACION	****
CBS LO - CBS R	****
CBS LO - CBS R MO	****
CBS LO - CBS R VEG	****
CBS LO - VEGETACION	****
CBS R - CBS R MO	****
CBS R - CBS R VEG	0.12456
CBS R - VEGETACION	****
CBS R MO - CBS R VEG	****
CBS R MO - VEGETACION	0.47247
CBS R VEG - VEGETACION	****

BANDA 4**U Mann-Whitney :**

SUPERFICIES	<i>p - value</i>
ARENA - CBS LC	***
ARENA - CBS LO	****
ARENA - CBS R	****
ARENA - CBS R MO	****
ARENA - CBS R VEG	****
ARENA - VEGETACION	****
CBS LC - CBS LO	****
CBS LC - CBS R	****
CBS LC - CBS R MO	****
CBS LC - CBS R VEG	****
CBS LC - VEGETACION	****
CBS LO - CBS R	****
CBS LO - CBS R MO	****
CBS LO - CBS R VEG	****
CBS LO - VEGETACION	****
CBS R - CBS R MO	****
CBS R - CBS R VEG	**
CBS R - VEGETACION	***
CBS R MO - CBS R VEG	****
CBS R MO - VEGETACION	0.10766
CBS R VEG - VEGETACION	****

BANDA 5**U Mann-Whitney :**

SUPERFICIES	<i>p - value</i>
ARENA - CBS LC	**
ARENA - CBS LO	****
ARENA - CBS R	****
ARENA - CBS R MO	****
ARENA - CBS R VEG	****
ARENA - VEGETACION	****
CBS LC - CBS LO	****
CBS LC - CBS R	****
CBS LC - CBS R MO	****
CBS LC - CBS R VEG	****
CBS LC - VEGETACION	****
CBS LO - CBS R	****
CBS LO - CBS R MO	****
CBS LO - CBS R VEG	***
CBS LO - VEGETACION	0.80881
CBS R - CBS R MO	****
CBS R - CBS R VEG	****
CBS R - VEGETACION	****
CBS R MO - CBS R VEG	****
CBS R MO - VEGETACION	****
CBS R VEG - VEGETACION	****

BANDA 6**U Mann-Whitney :**

SUPERFICIES	<i>p - value</i>
ARENA - CBS LC	0.0962
ARENA - CBS LO	****
ARENA - CBS R	****
ARENA - CBS R MO	****
ARENA - CBS R VEG	****
ARENA - VEGETACION	****
CBS LC - CBS LO	****
CBS LC - CBS R	****
CBS LC - CBS R MO	****
CBS LC - CBS R VEG	****
CBS LC - VEGETACION	****
CBS LO - CBS R	****
CBS LO - CBS R MO	****
CBS LO - CBS R VEG	0.5205
CBS LO - VEGETACION	0.1183
CBS R - CBS R MO	*
CBS R - CBS R VEG	****
CBS R - VEGETACION	****
CBS R MO - CBS R VEG	****
CBS R MO - VEGETACION	****
CBS R VEG - VEGETACION	**

BANDA 7**U Mann-Whitney :**

SUPERFICIES	<i>p - value</i>
ARENA - CBS LC	0.27329
ARENA - CBS LO	****
ARENA - CBS R	****
ARENA - CBS R MO	****
ARENA - CBS R VEG	****
ARENA - VEGETACION	****
CBS LC - CBS LO	****
CBS LC - CBS R	****
CBS LC - CBS R MO	****
CBS LC - CBS R VEG	****
CBS LC - VEGETACION	****
CBS LO - CBS R	****
CBS LO - CBS R MO	****
CBS LO - CBS R VEG	***
CBS LO - VEGETACION	**
CBS R - CBS R MO	***
CBS R - CBS R VEG	****
CBS R - VEGETACION	**
CBS R MO - CBS R VEG	****
CBS R MO - VEGETACION	**
CBS R VEG - VEGETACION	0.95775